

THESES

présentées à

LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

pour obtenir le grade de DOCTEUR ES SCIENCES MATHÉMATIQUES

par Monsieur FEUVRIER Charles

SUJET DE LA 1ère THESE

" LA SIMULATION DES SYSTEMES "

SUJET DE LA 2ème THESE : (propositions données par la Faculté)

" APPLICATION : SIMULATION D'UN SYSTEME "

soutenues le 10 avril 1970 devant la commission

composée de :

Président

M. ARSAC

Examineurs

M. NAMIAN

M. VIGNES

M. WICKHAM



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549911_0023

AVANT PROPOS

J'EXPRIME MA PROFONDE RECONNAISSANCE A MONSIEUR LE PROFESSEUR ARSAC QUI M'A ORIENTE ET AIDE DANS MES RECHERCHES.

JE REMERCIE AUSSI MONSIEUR LE PROFESSEUR NAMIAN POUR L'INTERET QU'IL A PORTE A CETTE ETUDE AINSI QUE MESSIEURS LES PROFESSEURS VIGNES ET WICKHAM QUI ONT BIEN VOULU ACCEPTER DE FAIRE PARTIE DU JURY.

QUE TOUS CEUX QUI M'ONT PERMIS DE MENER A BIEN CE TRAVAIL, AUX U.S.A. COMME EN FRANCE, TROUVENT ICI L'EXPRESSION DE MA GRATITUDE.

T H E S E S

PRESENTEES A

LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES MATHÉMATIQUES

PAR MONSIEUR FEUVRIER CHARLES

SUJET DE LA 1ERE THESE : "LA SIMULATION DES SYSTEMES"

SUJET DE LA 2EME THESE : (propositions données par la Faculté)

"APPLICATION : SIMULATION D'UN SYSTEME"

SOUTENUES LE 10 AVRIL 1970 DEVANT LA COMMISSION

COMPOSEE DE :	Président	M. ARSAC
	Examineurs	M. NAMIAN
		M. VIGNES
		M. WICKHAM

THÈSE

PRÉSENTÉE À

LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES MATHÉMATIQUES

PAR MONSIEUR FROSTEN CHARLES

SUJET DE LA 1^{RE} THÈSE : "LA SIMULATION DES SYSTÈMES"

SUJET DE LA 2^{DE} THÈSE : (Composition donnée par la Faculté)

"APPLICATION : SIMULATION D'UN SYSTÈME"



DOCTEUR LE 10 AVRIL 1970 DEVANT LA COMMISSION

COMPOSÉE DE : Président

Examinateurs

R. VIGNES

R. WICKHAM

R E S U M É

La première thèse, *exposée dans ce document*, concerne l'aspect théorique de la technique de simulation. Cette étude montre d'abord comment s'intègrent les concepts de système, modèle et simulation. Elle présente ensuite une méthode de simulation, axée principalement sur les systèmes de gestion ; enfin, elle délimite le champ actuel de la simulation par les réalisations en cours.

La seconde thèse, essentiellement pratique, est un exemple précis étudié pour lui-même et pour illustrer la méthode. Cette application a pour but de mettre à l'épreuve, grâce à la simulation, un nouveau système de traitement de produits laitiers à l'échelle d'un canton du Haut Jura. Elle comporte :

- . une analyse du problème du lait, de sa transformation et de sa commercialisation dans le district de l'étude en particulier ;
- . le recueil des données nécessaires à la construction des modèles ;
- . la simulation, sur Univac 1108 et en langage Fortran V, du système proposé représentant le groupement de 23 petites coopératives laitières artisanales en une grande usine moderne de fabrication ;
- . enfin, une analyse des résultats obtenus dans différentes hypothèses, en manipulant le modèle.

Celle-ci fait apparaître que la modernisation du système actuel ne conduirait pas à des revenus plus substantiels, mais que par contre, pour être vraiment rentable, le système à mettre en place doit être conçu globalement et aboutir aux produits finis directs et dérivés ainsi qu'à leur commercialisation.

TABLE DES MATIERES

Pages

	Introduction : La simulation vieille comme le monde	1
--	---	---

I. LES SYSTEMES

1.0	Introduction : Champ d'application des systèmes	3
1.1	Définition et éléments constitutifs	4
1.2	Classifications	9
1.3	Fonctionnement de principe	12
1.4	Etude et construction de systèmes	23
1.5	Qualités d'un système	27
1.6	Le concept des systèmes globaux	29
1.7	Conclusion : l'avenir des systèmes	32

II. LES MODELES

2.0	Introduction : Les modèles d'avions	34
2.1	Définition et description des modèles	35
2.2	Classifications	37
2.3	Construction d'un modèle économique	44
2.4	Qualités : objectivité et simplicité ...	49
2.5	Modèles et réalité : les hypothèses	50
2.6	Conclusion. Le modèle : pont entre l'observation et la spéculation	58

III. LA SIMULATION

3.0	Introduction : La simulation, méthode ancienne rajeunie par les ordinateurs ..	59
3.1	Définition	60
3.2	Buts	63
3.3	Classifications	69
3.4	Avantages	72
3.5	Limites	73
3.6	Conclusion : Ses résultats sont à interpréter avant d'être appliqués au monde réel	74

IV. LA SIMULATION DES SYSTEMES

4.0	Introduction : Nécessité d'une méthode - Son cadre	75
4.1	La méthode de simulation des systèmes en général et des systèmes de gestion en particulier	77
4.2	Les mathématiques de la simulation des systèmes	85
4.3	Les techniques de la simulation des systèmes ...	87
4.4	Les langages de simulation	111
4.5	Validité des simulations	123
4.6	Champ d'application	128
4.7	Conclusion : Vers le modèle de simulation parti- culier à chaque entreprise	143

V. CONCLUSION GENERALE

Résultats acquis et recherches complémentaires..	144
--	-----

ANNEXES ET BIBLIOGRAPHIE

	Pages
Annexe 4.2 Lois de répartition de probabilité. Exemple de présentation	148
Annexe 4.4 Analyse et Possibilités des Langages de Si- mulation : GPSS, Simscript. Particularités de certains autres	149
Annexe 4.5 Exemple de test en χ^2	166
Annexe 4.6 Exemples de modèles de Simulation construits en France	171
Bibliographie	173

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES ---

	Pages
Figure 1.1 Système élémentaire	12
Figure 1.2 Filtre d'entrée	15
Figure 1.3 Système à rétroaction	16
Figure 1.4 Mécanisme de rétroaction	17
Figure 1.5 Mécanisme de contrôle par rétroaction	17
Figure 1.6 Importance des plans et de la gestion dans le fonctionnement de la rétroaction	19
Figure 1.7 Agencement de systèmes et de sous-systèmes	18
Figure 1.8 Combinaison de circuits de rétroaction ...	20
Figure 1.9 Influence de l'environnement humain sur un système	22
Figure 2.1 Fragment d'un modèle de procédure	41
Figure 2.2 Système et modèle	47
Figure 3.1 Expérimentation directe et indirecte	62
Figure 3.2 Simulation de diverses constructions d'un système	64
Figure 4.1 Etapes d'une méthode de simulation des systèmes	76
Figure 4.3C La méthode du temps à pas variable	107
Tableau 4.4.1 Les langages de simulation	113
Figure 4.4.2 Simplification de construction et de pro- grammation d'un modèle, en utilisant un langage de simulation	115
Tableau 4.4.3 Caractéristiques de construction concernant certains langages de simulation	118
Tableau 4.4A.1 Les composants d'un système en GPSS	149
Tableau 4.4A.2 Exemple GPSS	150
Figure 4.4A.3 Organigramme GPSS	154
Tableau 4.4A.4 Correspondances GPSS-Simscrip	159
Tableau 4.4A.5 Aperçu des instructions Simscrip	160
Figure 4.5A Courbe χ^2	166

LA SIMULATION DES SYSTEMES

INTRODUCTION

Il y a beau temps que l'homme, face à tout problème pratique, se met à la recherche de la meilleure solution. Les héros de l'Antiquité avaient déjà ce souci. Voici comment la belle Didon, fondatrice de Carthage, résolut le sien.

Fugitive de Tyr après la mort du roi son père, elle aborda donc un jour avec ses fidèles, aux rives du pays des Libyens. On sait qu'hostiles à l'installation entreprenante de nouveaux venus sur leur territoire, les peuplades de la région finirent par consentir à la princesse tyrienne et aux siens, une aumône dérisoire : "autant de terre qu'en pourrait délimiter une peau de boeuf". Pas découragée le moins du monde, Didon les prit au mot et chercha tout justement la meilleure solution.

Elle fit découper cette peau en très fines lanières qui, mises bout à bout, permettaient déjà d'enclore un terrain assez vaste. Ensuite, elle eut l'idée d'entourer une surface côtoyant le bord de mer, sur lequel elle n'avait pas besoin de lanières de boeuf ; ainsi une étendue plus considérable encore se trouvait-elle délimitée. Enfin, elle eut à résoudre un problème mathématique à l'énoncé simple : quelle forme choisir pour envelopper la plus grande surface, étant donné un périmètre fixe ? La légende rapporte qu'elle essaya, d'abord, avec sa ceinture de lin, d'enclore des surfaces géométriques variées : rien d'autre, en somme, qu'un recours à la simulation. Tout compte fait, elle décida que les lanières de peau devaient être disposées en demi-cercle. C'est sur ce terrain que Didon bâtit Byrsa, "cuir de boeuf", qui fut l'acropole de Carthage dont elle devint la reine.

Plus de quatre siècles avant notre ère, le géomètre grec Zénodore avait déjà essayé de prouver que le cercle englobe une plus grande surface que n'importe quelle autre figure de même périmètre ; mais ce théorème n'a été rigoureusement démontré qu'au siècle dernier.

Les hommes sont toujours en quête de meilleures solutions ; les savants recherchent, eux aussi, les procédés, les méthodes et les techniques de l'optimum : démonstrations et expérimentations en font partie. Mais, dans la vie, tout n'est pas démontrable, la démonstration peut demander des siècles de réflexion, et l'expérimentation n'est pas toujours possible. C'est ici que se place, comme suppléant de la démonstration et de l'expérimentation, la technique de la simulation. Son tout neuf intérêt tient à l'utilisation des ordinateurs, qui multiplient sa puissance. Son but est tout simplement la recherche de la solution optimale quelquefois, d'une meilleure solution le plus souvent, et parfois de la moins mauvaise.

*
* *
*

Pour être efficace, la simulation doit s'appliquer à un ensemble. Elle suppose, avant d'être utilisée et même pour être comprise, une connaissance précise des systèmes, et des modèles.

Une fois ces notions acquises, l'analyse de la simulation en général, et de la simulation des systèmes de gestion en particulier, permettra de découvrir les étapes de cette construction et ses particularités. Quant à son champ d'application actuel, il sera tout naturellement délimité par les réalisations en cours.

*
* *
*

I. - SYSTEMES

INTRODUCTION

Les concepts de simulation, modèle, et système, sont intrinsèquement liés, la simulation étant d'une façon générale une méthode pour étudier les systèmes, à l'aide de modèles. Schématiquement, on peut dire que *la simulation est une manipulation de modèle, et le modèle, une représentation de système.*

La notion de système n'est pas nouvelle. Depuis longtemps, les termes "systèmes osseux, musculaire, circulatoire, nerveux" font partie du vocabulaire des écoliers, à la découverte du corps humain et de son fonctionnement. Darwin, dans sa théorie de l'évolution, intégrait toute vie dans "un système de la nature". Avant lui, Newton a construit "un système du monde", fondé sur la loi de la gravitation universelle.

C'est pendant la dernière guerre mondiale, qui a nécessité des productions énormes de toutes sortes, la formation de millions de combattants, des transports gigantesques de personnel et de matériel, le tout dans le minimum de temps, qu'a pratiquement commencé l'étude des grands systèmes complexes avec intervention humaine.

De nos jours, le mot système est couramment utilisé dans tous les domaines de la vie et du savoir : ne parle-t-on pas de systèmes : métrique, hydraulique, électrique, téléphonique, jurassique, planétaire, philosophique, social, électoral, économique .. de systèmes de forces, de vecteurs, d'équations, de référence, de Linné, de Havers, d'Artillerie, d'armes, de pointage, de transport, de Taylor, de gestion, d'ordinateurs, d'information, etc...

Aussi convient-il de dégager les éléments fondamentaux et constitutifs d'un concept aussi général, de classer les systèmes qui se prêtent à la simulation, d'analyser leur fonctionnement et leurs qualités, ainsi que la façon de les construire et de les étu-

dier, soit en eux-mêmes, soit dans l'optique de systèmes globaux. Cette étude facilitera la compréhension et la construction de modèles.

I.1 DEFINITION D'UN SYSTEME

Il n'est pas étonnant de trouver de nombreuses définitions du mot "système", eu égard à l'immense champ d'application qu'il couvre. Le rappel de quelques-unes facilitera la découverte de l'essence même des systèmes :

- Ensemble de composants reliés entre eux (1,50)*.
- Ensemble organisé d'éléments fonctionnels (3,9).
- Ensemble interconnecté d'éléments reliés fonctionnellement les uns aux autres (2,7).
- Configuration logique de composants déterminés et intéressant un même type de problèmes (2,24).
- Ensemble de composants destinés à accomplir un but particulier, suivant un plan (2,21).
- Ensemble de composants humains et mécaniques, en connexion pour réaliser un but défini par la Direction (1,13).
- Combinaison d'hommes, de machines, de matériaux et d'informations destinée à satisfaire un objectif donné (2,20).
- Ensemble de choses et de relations qui les unissent entre elles et entre leurs attributs (2,26).
- Un tout complexe composé de plusieurs parties souvent diversifiées et ordonnées suivant un même plan ou servant un but commun (1,5).
- Combinaison de parties qui se coordonnent, pour concourir à un résultat ou de manière à former un ensemble (Larousse).
- Phénomène défini de façon opératoire par la liste des variables à prendre en considération (3,22).

Ces définitions sont plus ou moins claires et précises ; ce qui ne saurait surprendre, car la définition d'un terme général au vaste champ d'application, ne s'accommode guère de précision. C'est pourquoi, il nous est apparu préférable, au lieu de chercher une définition lapidaire, d'énumérer les qualités fondamentales qui définissent l'essence même d'un système et de présenter quelques exemples significatifs.

* Référence à la bibliographie en annexe.

DEFINITION

Il s'agit tout d'abord d'un tout, d'un ensemble composé de parties ordonnées. Ces parties ont chacune leurs lois et une certaine indépendance. Par contre, le tout a ses lois propres, car il existe entre les parties des liens, des relations identifiables, au moins pour quelques unes d'entre elles, et qui s'enchaînent souvent l'une l'autre.

Cet ensemble change avec le temps.

Un système n'existe pas dans le vide, mais dans un milieu qui réagit sur lui et qu'il influence.

Il est, le plus souvent soumis à des contraintes.

Enfin, un système n'existe que pour atteindre un but suivant un plan, et son fonctionnement est contrôlé.

EXPLICATIONS

De cette définition générale, il ressort tout d'abord que plusieurs conditions doivent être réalisées pour avoir un système :

- la connaissance des composants,
- la connaissance des lois propres de chacun,
- la connaissance des lois d'interaction qui déterminent son but.

La juxtaposition d'éléments dont on ignore les relations ne saurait donc constituer un système.

Une usine de production, exemple de système intégré, comprend les parties principales suivantes : la main-d'oeuvre, l'approvisionnement et les stocks, les achats, l'ordonnancement, la fabrication, les ventes, la distribution et l'administration. Chaque composant a ses lois ; il est partiellement indépendant ; mais il est aussi fonction des autres et réagit sur eux. De la connaissance des lois d'interaction appliquées judicieusement dépendent la rentabilité de l'usine, les investissements et le bénéfice.

Ensuite, tout système est affecté par les facteurs temps, milieu et contraintes. Une usine ne reste jamais semblable à elle-même ; son évolution est marquée par la direction, les ouvriers et le milieu ; enfin, elle est soumise à de nombreuses contraintes internationales, nationales, régionales et syndicales.

Le corps humain est aussi un bon exemple de système: c'est un organisme complexe, composé de parties, désignées sous le nom de systèmes dont chacun a ses lois et concourt à la vie de l'ensemble. Le corps humain change et n'est pas insensible au milieu.

Dans un autre ordre d'idées, un avion est encore un bon exemple de système mécanique. Il est formé d'éléments fonctionnels tels que les moteurs, la cellule, les batteries, les instruments etc...L'efficacité de l'ensemble dépend de la façon dont fonctionne chaque élément dans son cadre. Sa finalité est d'assurer le transport des passagers et du fret.

Dans le système solaire, les éléments sont les planètes et le soleil. Il existe entre eux des relations qui s'expriment sous la forme de vecteurs et qui déterminent leurs positions et vitesses relatives.

En chimie, des lois fixent les relations entre le volume, la pression et la température des gaz. Le langage est lui-même un système composé de phones, de phonèmes et de morphèmes. Leurs relations sont les règles de leur enchaînement. Un système familial est composé d'individus qui ont, entre eux, des relations de parenté, de même qu'un système social comprend des classes d'individus interdépendantes. Les nations sont les éléments d'un système international où s'entrecroisent relations amies et ennemies.

Dans les systèmes économiques, industriels et militaires, les parties sont caractérisées par les ressources en hommes - dirigeants et exécutants -, les diverses énergies, le matériel, les matières premières, et l'information ; les relations sont constituées par les plans, les directives, les règlements, les modes d'emploi ; on peut aussi considérer ces systèmes sous un autre aspect, en les comparant au corps humain : les éléments productifs ressemblent aux systèmes musculaire et osseux, la gestion au système circulatoire, l'information au système nerveux et la Direction au cerveau.

Le facteur temps, ainsi que l'environnement modifient évidemment tous ces systèmes, en particulier quand l'homme intervient. Ainsi un système économique est affecté par les clients, les concurrents, les syndicats, les organisations professionnelles, les producteurs, les transporteurs, les intermédiaires etc... dont la réunion forme le milieu.

Ces quelques exemples montrent, d'une part, que les notions de plan, de méthode, d'ordre et d'arrangement font partie intrinsèque de l'idée de système, et d'autre part, qu'on peut hiérarchiser les systèmes en raison de leur complexité et de l'intervention humaine.

On classe en général, au bas de l'échelle, les structures apparemment statiques et surtout descriptives (la géographie) ;

Puis viennent dans l'ordre :

- les mécanismes aux mouvements déterminés (système solaire, systèmes physiques et chimiques) ;
- les thermostats et homéostats (systèmes de régulation) ;
- la cellule vivante qui subvient à ses besoins (systèmes non fermés) ;
- les systèmes
 - végétaux ;
 - animaux avec l'image ;
 - humains avec le langage et les idées ;
 - sociaux avec leurs lois, leurs traditions, leur histoire, leurs arts

Enfin au sommet de cette hiérarchie, on découvre les systèmes transcendants, qui ont, eux aussi, leur structure et leurs relations.

Ainsi les composants d'un système peuvent être des objets, des machines, des produits finis, des pourcentages de vente, des prix, des indices de production, des secrétaires, des ouvriers etc... En outre, ils peuvent être permanents ou temporaires ; dans un système ferroviaire par exemple, la locomotive est un élément permanent, mais le nombre et la catégorie de wagons varient dans la composition journalière des trains. De même, les relations entre les parties peuvent varier à l'infini, comme les relations entre le prix de revient et le prix de vente, entre les prix et les volumes de vente, entre les ventes et les frais de publicité, entre la demande, le stock et la commande etc...

Les facteurs temps et contraintes, qui affectent un système, sont des notions familières. En effet, les changements qui surviennent dans le temps sont facilement discernables. Les contraintes, de leur côté sont imposées sous forme de limitations, en raison des définitions des sorties et des spécifications de l'équipement. Elles agissent directement et impérativement sur la conduite de l'opération. Telles sont les contraintes mécaniques et policières dans le système de circulation routière.

Par contre, il est souvent difficile de différencier le système et son environnement. Le consommateur, par exemple, fait partie du milieu, mais son goût et son pouvoir d'achat peuvent faire partie du système. L'environnement est tout ce qui peut influencer le système, ainsi que tout ce qui peut être changé par le comportement du système. Dans les affaires, l'environnement est considéré comme l'ensemble des activités et organismes sur lesquels la direction et la gestion d'une entreprise n'ont aucune action *directe*, comme les banques, les syndicats, les consommateurs, les concurrents, le public, l'administration, l'économie générale du pays etc...

Il faut bien reconnaître que la séparation entre le système et son environnement est souvent arbitraire : on "découpe" le système à étudier dans un ensemble et ce qui reste constitue le milieu. Par exemple, un régulateur est un système, mais c'est un organe de la machine, qui est elle même un organe de l'usine.

On se rend compte que l'environnement a, tout de même, une importance considérable et même vitale ; il n'est donc pas à considérer comme accessoire. Bien au contraire, un système n'est compris et ne vit que dans son cadre physique, biologique, social et psychologique.

Enfin, dans la définition que nous avons donnée d'un système, il reste à expliciter les deux facteurs : finalité et contrôle; ils le seront dans les paragraphes relatifs au fonctionnement des systèmes et à la description des systèmes de contrôle.

I.2 CLASSIFICATION

Les systèmes sont classés selon diverses catégories. La première comprend les systèmes naturels et ceux construits par l'homme. Ces derniers peuvent s'appeler différemment suivant leur objet : c'est ainsi que fonctionnent des systèmes industriels, économiques, militaires, sociaux, politiques ... Chacun d'eux est subdivisé. Les systèmes militaires, par exemple, comprennent, entre autres, des systèmes de commandement, des systèmes opérationnels, tactiques, stratégiques, logistiques. Les systèmes logistiques se subdivisent à nouveau, en systèmes de ravitaillement, d'entretien, de réparations, de stocks etc ...

En outre, les systèmes construits par l'homme sont ou réels, quand ils existent vraiment, ou symboliques. Ils peuvent être aussi, officiels et officieux, ceux-ci ayant vu le jour sans avoir été conçus, ni voulus par la Direction d'une affaire.

Une autre catégorie est liée à la structure du système qui peut être soit élémentaire ou fermé, soit en boucle, soit auto-adaptifs.

Dans le premier cas, l'état des entrées n'affecte que l'état des sorties : les perturbations et les variations ne sont pas prises en considération. C'est le système des feux de croisements en dehors de la présence de l'agent.

Non seulement l'état des entrées, mais quelques unes de ses sorties, interviennent dans les modèles en boucle ; ils sont donc plus précis car ils réagissent contre les perturbations en

régime permanent, grâce à un mécanisme de régulation. Ainsi fonctionnent les thermostats qui déclenchent le chauffage, quand la température intérieure tombe en dessous d'un point choisi, et qui coupe le circuit quand elle arrive au niveau voulu, la différence entre ces deux températures représentant la plage d'insensibilité du régulateur. Ce type de système se nomme encore, système ouvert car il permet des échanges avec le milieu : tels sont tous les systèmes qui nécessitent une intervention humaine. Un système ouvert peut devenir fermé de deux manières : d'une part si les échanges avec l'environnement sont coupés, ou s'ils sont incorporés directement dans le système. Il est souvent fermé par simplification, mais il n'existe pas moins dans un environnement.

Enfin les systèmes auto-adaptifs vont au-delà, en ayant la possibilité de se modifier, d'une part, selon les mesures des conditions de fonctionnement et, d'autre part, selon les valeurs des entrées et des sorties, comparées à un critère de référence ou élaboré. Ils réagissent, non seulement, contre les perturbations du système proprement dit, mais aussi contre celles de l'environnement, grâce aux mécanismes variés de rétroaction et de servo-commandes, telle, par exemple, une usine moderne de raffinerie de pétrole.

Suivant son état, un système est stable, instable, évolutif et explosif. Il est stable si à la suite d'une perturbation extérieure, il reste en équilibre, c'est-à-dire inchangé ou s'il ne dépasse pas certaines limites. Il est instable dans le cas contraire. Il évolue si une adaptation est possible, sinon il est explosif. Dans un magasin, la longueur de la file d'attente détermine ces quatre états : si elle est constante dans le temps, le système est stable ; si elle varie continuellement, il est instable ; si elle peut être réglée par l'ouverture d'une caisse supplémentaire il est évolutif ; enfin si elle s'accroît indéfiniment, il est explosif.

L'état d'un système n'est pas seulement lié au facteur temps, mais aussi à un ensemble de variables, tels que le profit, les ventes, les commandes, la production etc...

La sensibilité d'un système est le degré de changement qui affecte son comportement, quand les paramètres varient, un par

un, car l'état d'un système change, chaque fois qu'un de ses composants change.

A l'intérieur de chaque discipline, une nouvelle classification apparaît. En physique, on définit des systèmes simples, isolés, linéaires, couplés, actifs, passifs, stables, instables, conservatifs, inverses, analogues

Enfin, les systèmes de contrôle demandent une attention particulière. Ils ne font pas partie intrinsèque de l'opération du système, qu'ils ont seulement pour but d'améliorer. - Voir figure 1.3 page 16 -

Un système n'est jamais parfait ; il est sujet à des variations et des erreurs. Par le mécanisme de rétroaction, il peut corriger lui-même certains changements fortuits, à condition que ceux-ci soient prévus dans son montage. Il en est d'autres qui seront détectés et corrigés par les systèmes de contrôle, qui font appel au même mécanisme de rétroaction - Voir figures 1.4 et 1.5 page 17 -

En outre, ces systèmes ont comme second rôle de mesurer le rendement matériel et humain de l'opération. Ils comprennent généralement les contrôles de production, de l'opération, de qualité, des stocks, des coûts, de gestion, d'entretien, des constructions et aménagements.

Les premiers, permettent à la Direction de s'assurer que les activités correspondent aux plans. Les contrôles de l'opération ont pris dans les Forces Armées une grande extension, en particulier dans le domaine des engins et des avions à hautes performances. Ces systèmes sont le plus souvent automatiques et font appel aux ordinateurs travaillant en temps réel. Les contrôles de qualité sont, chaque fois que c'est possible, incorporés dans l'opération du système. Les contrôles de stocks servent à maintenir les quantités nécessaires et suffisantes en magasins, à la fois pour les fournitures d'entrée et pour les sorties. Les systèmes de contrôle de coûts veillent à ce que les prix de revient restent dans des limites fixées. Les contrôleurs de gestion sont axés sur le système d'information de l'entreprise. L'entretien du matériel est devenu très onéreux en particulier depuis le développement de l'électronique ; il demande, en outre, un ensemble de

pièces de rechange constamment disponible et un contrôle suivi. Enfin, grâce aux méthodes PERT (Program Evaluation Review Technique) et CPM (Critical Path Method), une surveillance des constructions nouvelles et des aménagements est assurée au jour le jour.

L'énoncé simplifié de ces systèmes de contrôle avait pour but d'une part de définir leur raison d'être : maintenir les sorties du système dans les limites fixées par les plans, et améliorer sans cesse le fonctionnement de l'ensemble, et d'autre part de montrer qu'un système, sans contrôles, manquerait d'efficacité dans l'économie et la vie modernes.

I.3 FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME

La description et la classification des systèmes montrent qu'un système peut être divisé en sous-ensembles. Une entreprise comprend des sous-systèmes : financier, de production, de personnel, de vente, d'information, de stocks..... Mais que le système soit complexe ou simple, son fonctionnement est le même. Il s'agit d'atteindre un but, un objectif, à partir de données qui sont estimées et calculées, puis converties par une opération qui se déroule suivant un plan. Ainsi se présente le système le plus élémentaire avec ses entrées, son opération planifiée et sa sortie - Figure 1,1 -

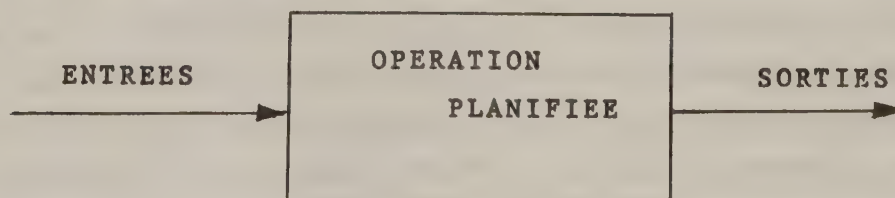
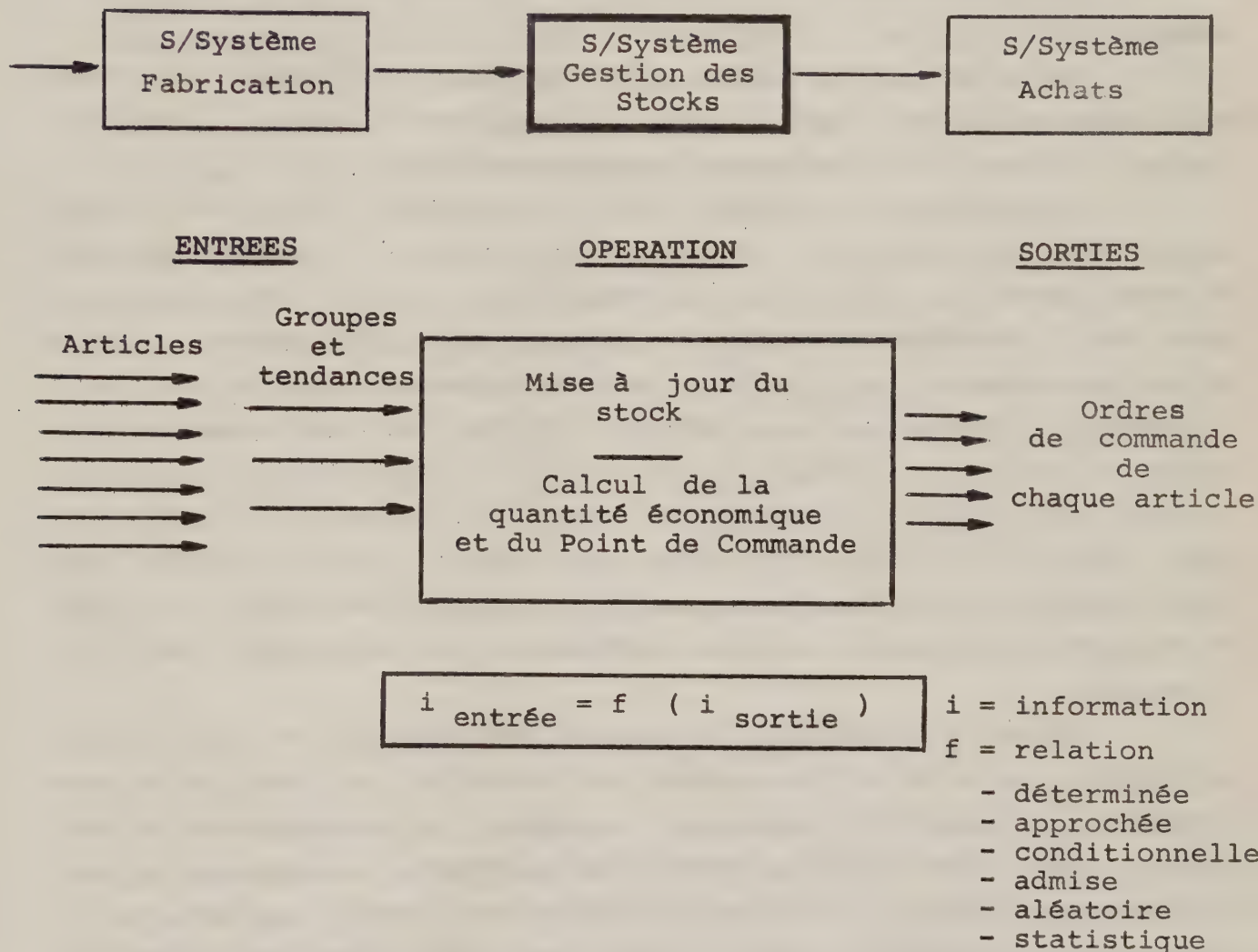


Fig. 1-1 SYSTEME ELEMENTAIRE

Ce schéma nous est familier, surtout depuis la mise en service des ordinateurs, qui ont été strictement conçus et programmés de cette façon.

Un exemple fera mieux comprendre ce mécanisme. Considérons un système de Gestion de Stocks ; ses entrées sont constituées par des articles réunis dans un fichier et dont le nombre atteint facilement 100 000 dans une usine de fabrication.



Contraintes :

- 1 - Stock de sécurité à garantir
- 2 - Commande la plus élevée possible (prix)
- 3 - Livraison échelonnée dans le temps (stock minimum)
- 4 - Coefficient de ponctualité du fournisseur (rupture de stock)

Cette masse d'informations à l'entrée est d'abord organisée. A cet effet, on classe les articles en groupes par valeur décroissante et on s'aperçoit par exemple que :

- 15% des objets représentent 80% de la valeur du stock
- 25% " " 15% " "
- 60% " " 5% seulement

Ces catégories conduisent à des modes de traitement différents.

En outre, ces articles sont consommés uniformément au cours de l'année ou suivant une tendance saisonnière ou autre, à déterminer par l'étude de l'historique des consommations.

L'opération du système est le traitement qu'on fait subir aux entrées pour obtenir les sorties qui dans le système considéré ne sont autres que les ordres de commandes. Ceux-ci définissent les quantités à commander à des dates précises. Ils sont générés à partir de la connaissance des besoins, des commandes en cours et de l'état du stock de façon à toujours maintenir ce dernier aussi bas que possible, les stocks représentant par nature un capital improductif. De ce fait, les commandes, globales à l'achat pour obtenir les meilleurs prix, sont à échelonner au cours de l'année ; elles doivent aussi tenir compte du maintien permanent d'un stock de sécurité, du temps de réapprovisionnement et d'un coefficient de régularité des fournisseurs.

Le stock de sécurité s'exprime généralement en jours de fabrication. La date de la commande est calculée en fonction de deux facteurs : le stock de sécurité à maintenir et la consommation pendant le temps nécessaire au réapprovisionnement. La quantité à commander pour rétablir un niveau de stock est donnée par une formule simple qui détermine le point le plus bas de la résultante des deux courbes : prix d'achat de l'article et frais de commande suivant la quantité commandée.

Un système de gestion de stocks est donc régi par des lois rigoureuses dont l'application assure l'approvisionnement de l'usine en pièces nécessaires à la fabrication, au prix le plus bas, compte tenu du facteur de sécurité.

Ainsi les lois que suit tout système s'expriment sous forme de relations fonctionnelles entre des éléments informationnels.

Les entrées, nous l'avons vu, peuvent revêtir des formes variées. Dans les systèmes de gestion, il est d'usage de les classer en trois catégories : l'information, l'énergie et les fournitures. Ces dernières se composent des matières premières et du matériel. L'énergie, humaine et matérielle, intervient surtout dans l'opération. Par contre, l'information a une double fonction car elle est associée à la fois à l'énergie et aux matières premières.

Dans la conception d'un système, la notion de filtre d'entrée se révèle efficace, car elle permet le rejet des données inutiles à son bon fonctionnement - Figure 1,2 -

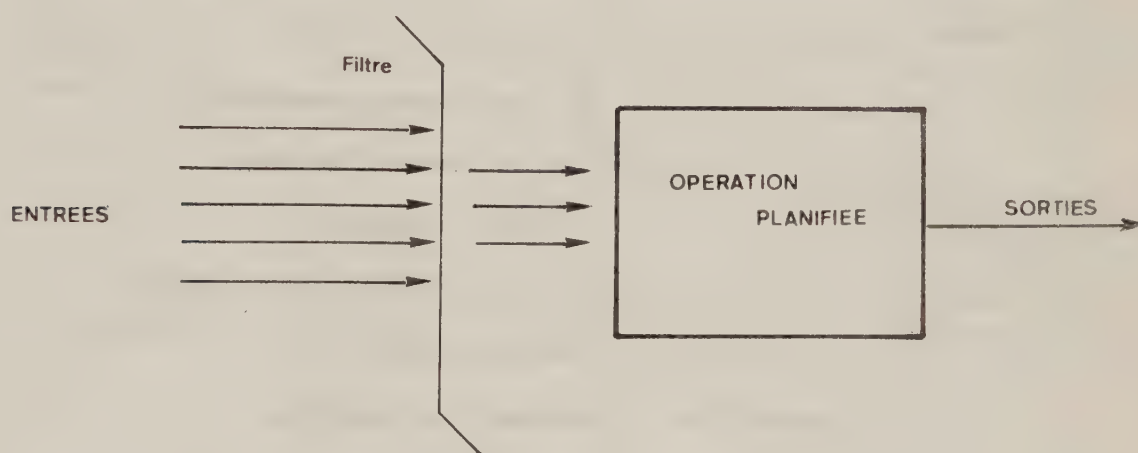
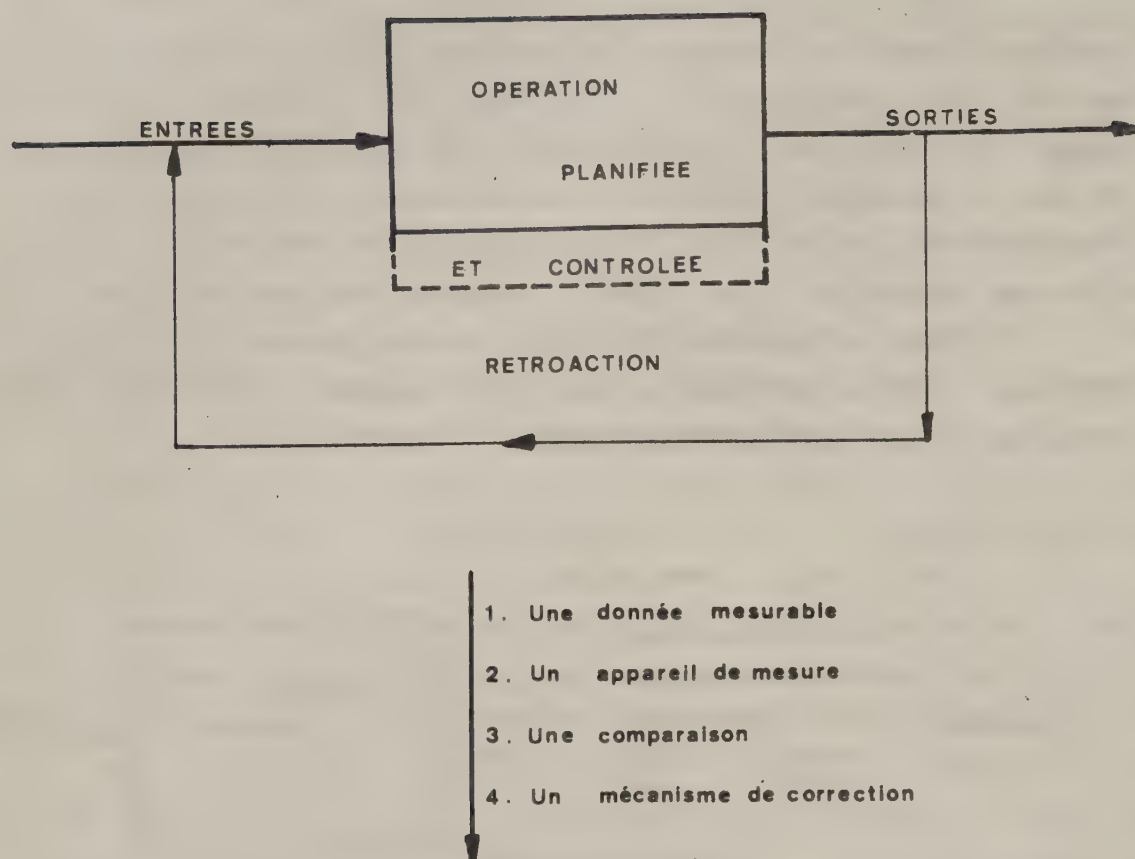


Figure 1-2 FILTRE D'ENTREE

Les entrées, comme l'opération elle-même, peuvent être modifiées par le mécanisme de la rétroaction. Celui-ci a pour but de maintenir la qualité et la quantité des sorties du système. Il comporte quatre éléments : une grandeur mesurable, sa mesure, la comparaison de cette mesure avec une valeur de référence et finalement une action corrective - Figure 1,3 -

La notion de rétroaction n'est pas nouvelle : elle fait partie des principes fondamentaux de l'automatisme ; celle de régulation est prise ici dans un sens identique, concrétisant une fonction de type récursif dans la formulation d'un système. Monsieur Mehl dans sa Théorie Cybernétique du Fait Administratif appelle la rétroaction : post-régulation.



1. Une donnée mesurable
2. Un appareil de mesure
3. Une comparaison
4. Un mécanisme de correction

Figure 1-3 SYSTEME A RETROACTION

Le choix de la grandeur de sortie est important : en effet, cette grandeur doit être significative ; elle est liée à l'opération du système ; elle annonce les perturbations. Elle peut être de différente nature : un spot sur un radar, une température, une pression, une position de pièce, un prix etc... Ensuite, elle doit être mesurable avec les mêmes unités qui ont servi à définir les normes ou les standards. Puis, elle est comparée à une valeur de référence de façon à déterminer l'écart. Parfois, cet écart sert, s'il est faible, à illustrer la qualité moyenne du produit fini, et s'il dépasse un certain niveau, à déclencher l'action correctrice de signe contraire - Figure 1,4 -

D'autres fois, la régulation crée automatiquement une action antagoniste qui neutralise tout écart, corrigeant ainsi d'une façon continue.

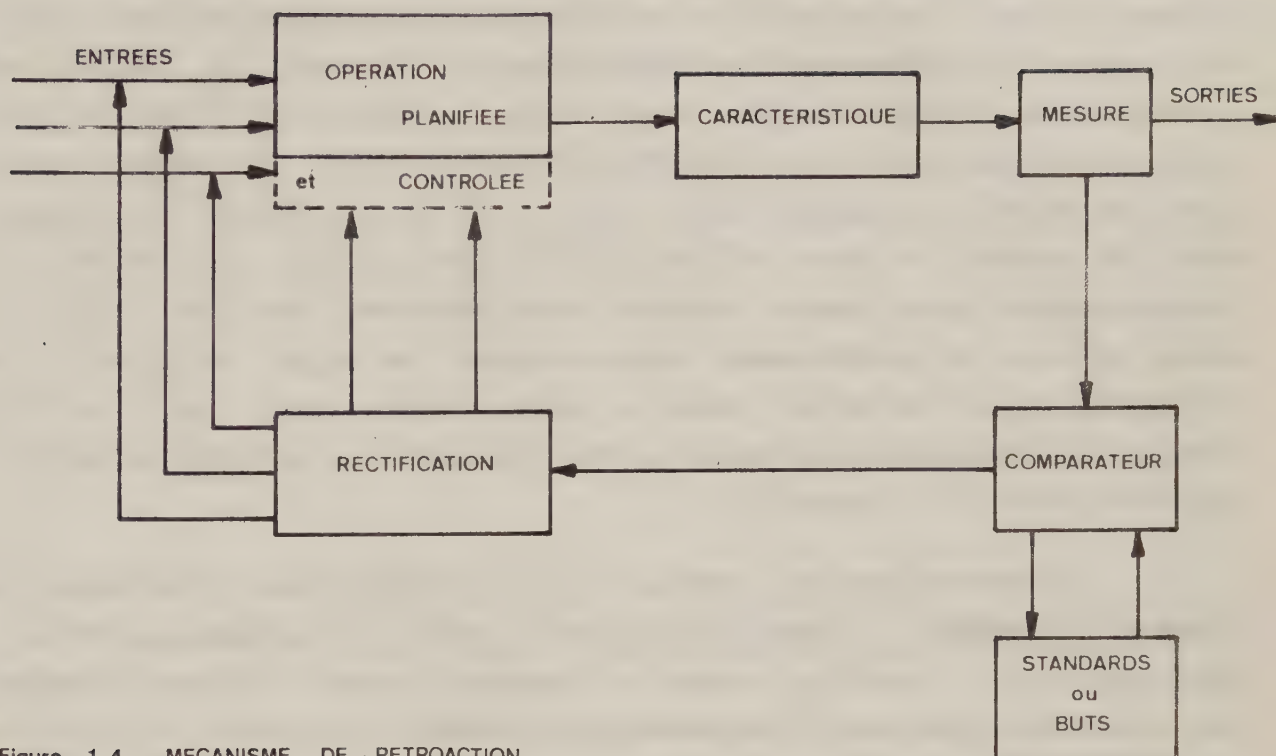


Figure 1-4 MECANISME DE RETROACTION

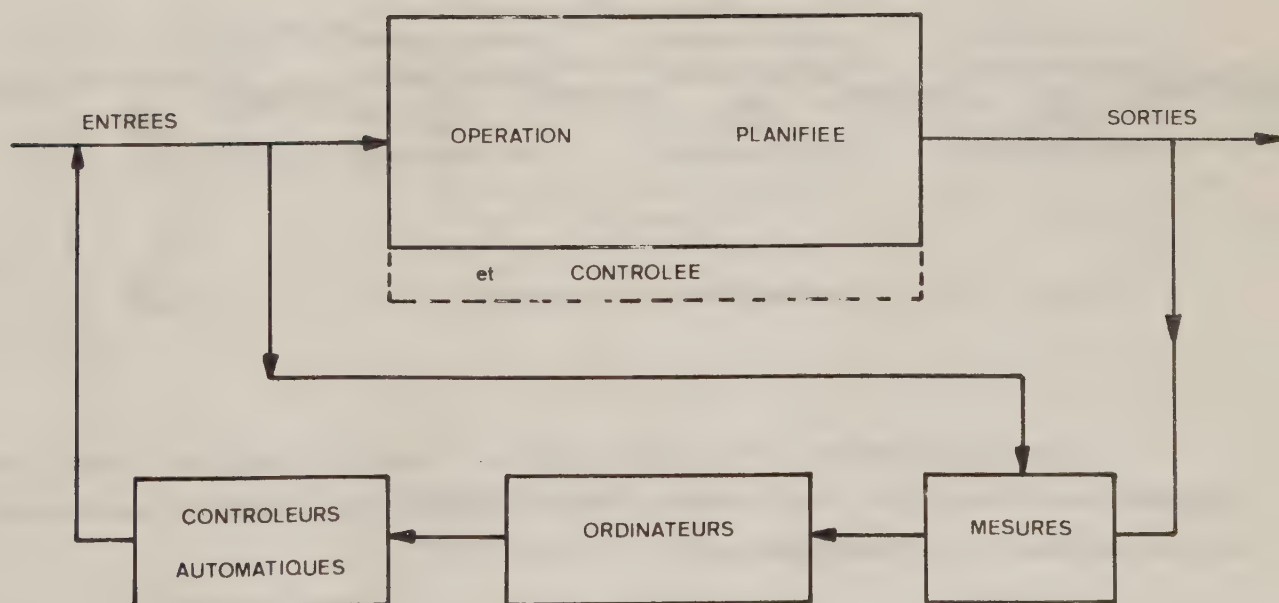


Figure 1-5 MECANISME DE CONTROLE PAR RETROACTION

Il convient de remarquer que la rétroaction n'agit qu'avec retard, introduisant, de ce fait, une erreur dans le temps. La correction peut intervenir au moment où la perturbation aura changé de sens, et provoquer des phénomènes de pompage. Ce défaut est combattu par réduction du temps entre la mesure et l'action correctrice, et surtout par le facteur anticipation, qui tient compte aussi bien de la grandeur de l'écart que de la vitesse de changement. En outre, la fonction régulation peut ne pas intervenir systématiquement dans chaque sortie, mais dans des sorties choisies selon un mode de prélèvement statistique. De plus, elle est liée aux plans de la Direction pour la phase comparaison, et à la Gestion pour l'action correctrice, quand celle-ci n'est pas automatique - Figure 1,6 - (page 19).

Le mécanisme de rétroaction n'affecte pas forcément le système lui-même ; il peut intervenir sur un système précédent. Nous avons vu, en effet, dans la composition et le fonctionnement des systèmes, que des sous-ensembles peuvent s'agencer les uns les autres et former une chaîne - Figure 1,7 -



Figure 1 - 7 AGENCEMENT DE SYSTEMES ET DE SOUS - SYSTEMES

Les sorties de l'un deviennent, sans transformation, les entrées de l'autre : telle est, précisément, la façon d'expliquer le mécanisme de l'intégration.

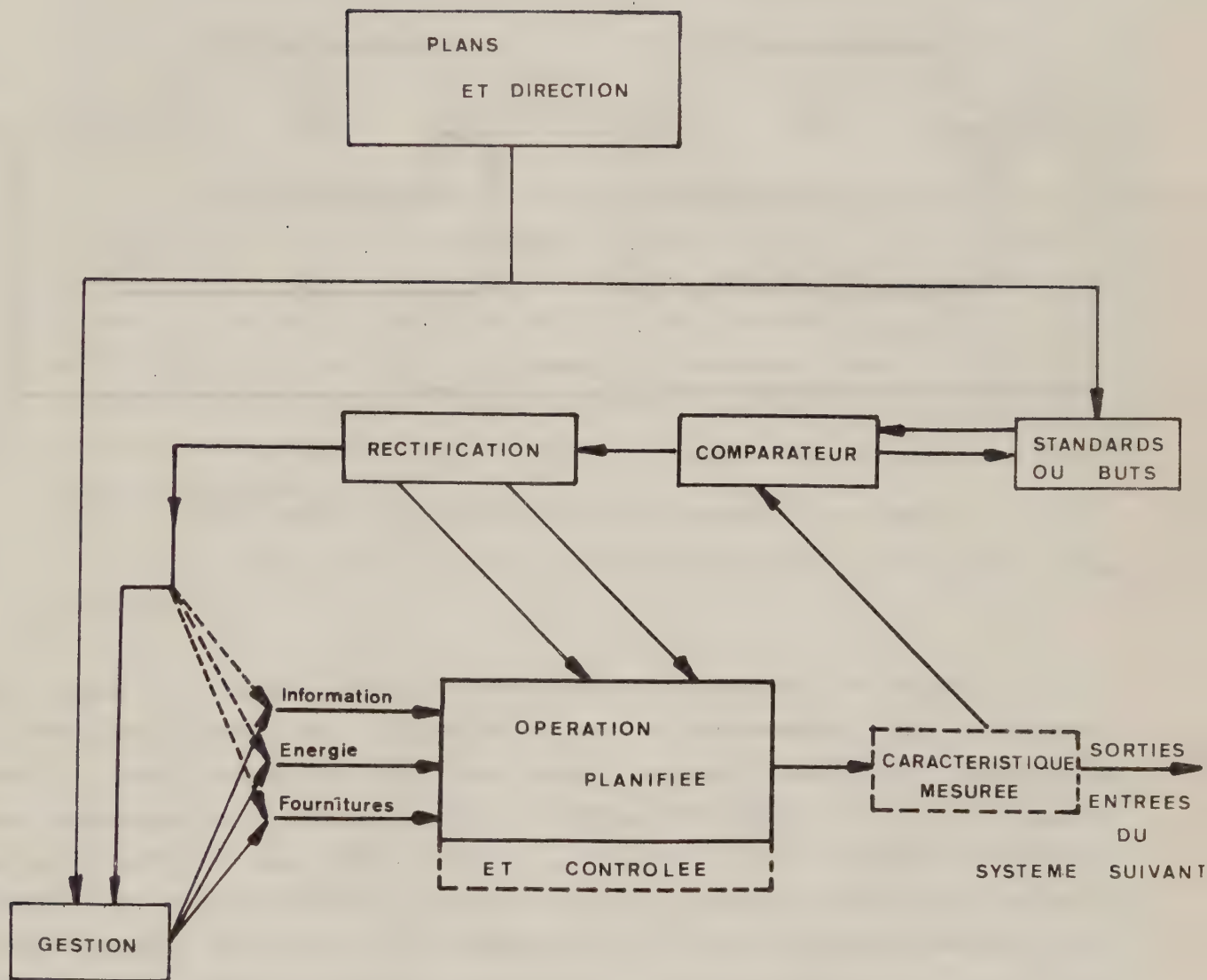


Figure 1-6

IMPORTANCE DES PLANS ET DE LA GESTION DANS LE
FONCTIONNEMENT DE LA RETROACTION

Dans cet ensemble, il est normal que des corrections puissent être apportées à un système précédent - Figure 1,8 -

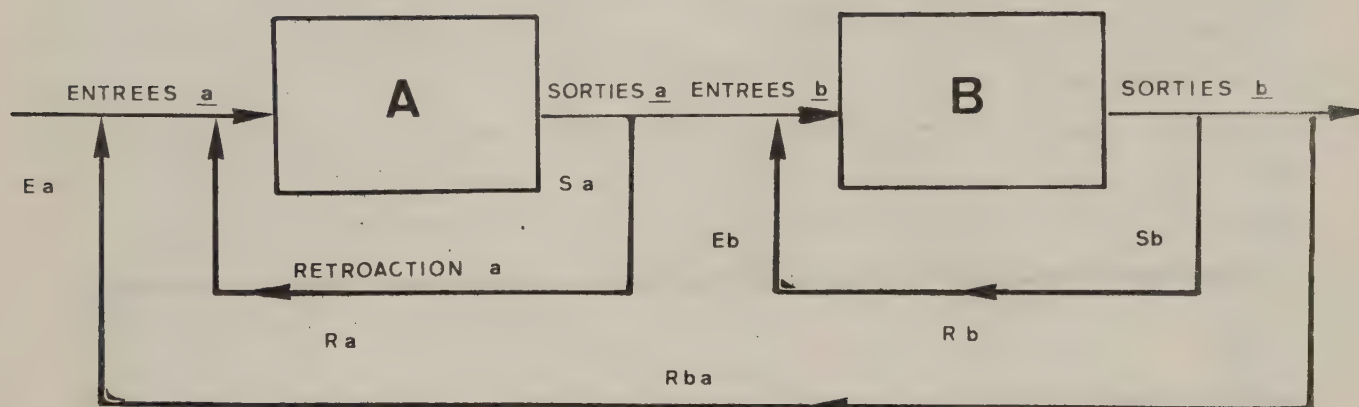


Figure 1-8 COMBINAISON DE CIRCUITS DE RETROACTION

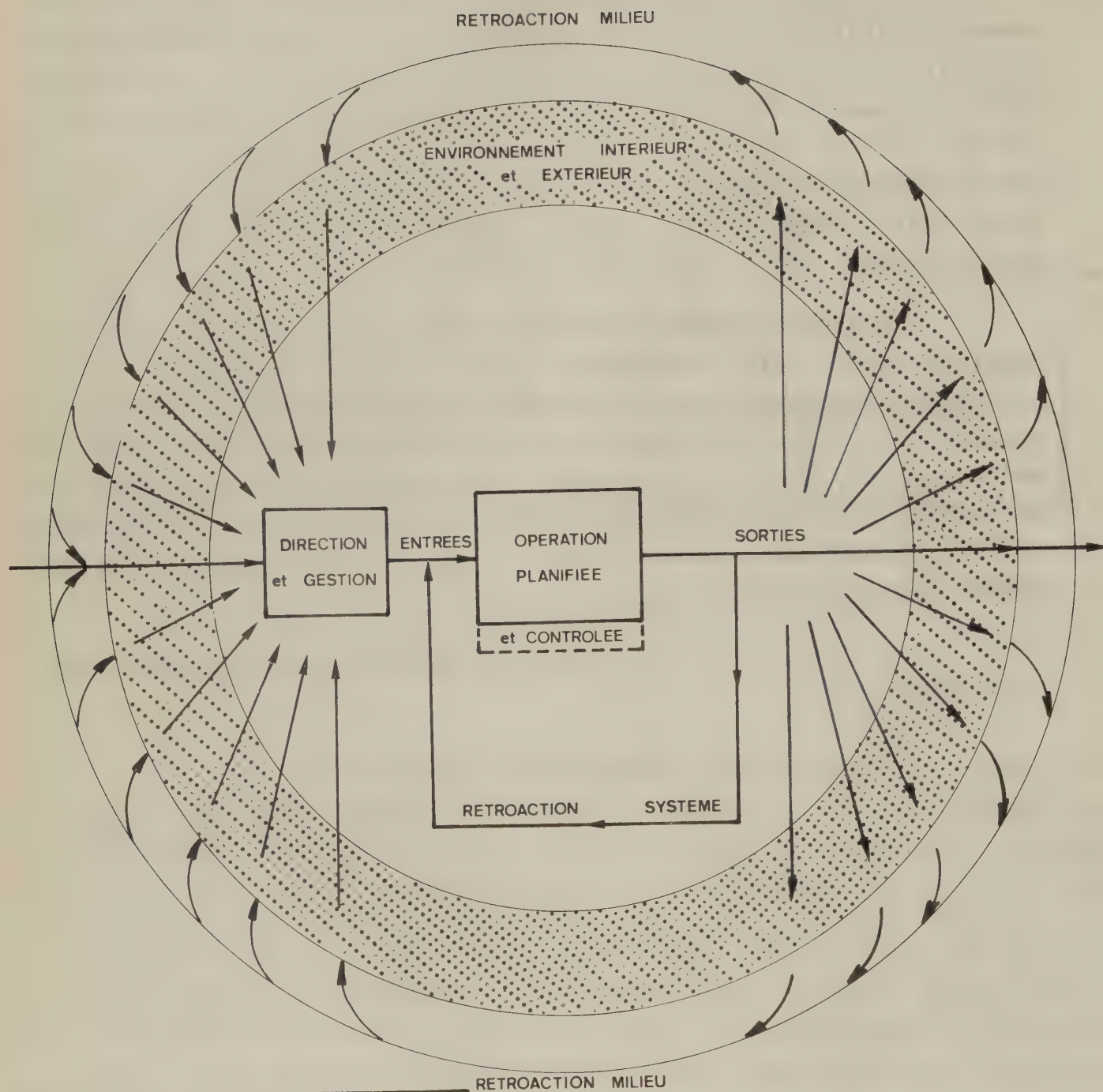
Dans un système, le rendement n'est pas ni la somme, ni la moyenne des rendements de chaque élément, et l'accroissement du rendement d'un élément ne se répercute pas forcément dans la même proportion sur le rendement général. En affichant, par exemple, une puissance double à ses réacteurs, on ne double pas du même coup la vitesse d'un avion. Mais d'un autre côté, la paralysie d'un élément peut amener celle du tout. Le rendement d'un système dépend donc, d'une part de la façon dont fonctionne chaque élément, et d'autre part de son ajustement dans le tout. Nous retrouvons ici l'essence même des systèmes : chacun des éléments a ses lois propres et le tout aussi. C'est pourquoi, il convient d'agir sur l'un et l'autre pour améliorer un système. Les ensembles individuels sont en général bien exploités ; par contre, dans les grands ensembles d'aujourd'hui, il devient de plus en plus difficile d'estimer les effets produits par les diverses combinaisons des systèmes individuels.

C'est par le même mécanisme de rétroaction que l'environnement modifie le système. L'appareil de chauffage entre en action quand la température intérieure tombe en dessous de 19° , mais cette remise en marche est différente, si la température extérieure est à 10° ou -10° , la régulation se faisant à rapidité dépendante. Il en est de même en biologie, pour le maintien d'une température déterminée chez l'homme et les animaux supérieurs, vivant à l'équateur ou aux pôles.

Dans les systèmes économiques et sociaux, l'environnement humain joue un rôle primordial, allant jusqu'à transformer leur structure et modifier leurs objectifs. En négligeant la rétroaction milieu, on ne voit pas comment de tels systèmes pourraient normalement survivre, sauf par accident. Un nouveau produit est lancé sur le marché, un constructeur de voitures automobiles change ses modèles, le gouvernement taxe le vin ...: par quel processus l'environnement intervient-il ?

La rétroaction milieu peut se décomposer en quatre phases.

- Figure 1,9 -



1. Le milieu prend connaissance des sorties du système.
2. Réactions du milieu.
3. Acheminement de ces réactions vers les responsables des entrées et de l'opération du système.
4. Corrections apportées par les responsables et production de nouvelles sorties.

Figure 1-9 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT HUMAIN SUR UN SYSTEME

Tout d'abord, les sorties du système pénètrent dans le milieu qui en prend connaissance. Cette première phase est souvent préparée par les agences de publicité, qui essaient d'influencer l'opinion. Puis, le milieu réagit favorablement, ou défavorablement, ou ne réagit pas, et ses réactions sont acheminées par certains circuits jusqu'aux responsables des entrées et de l'opération du système. Cette deuxième phase est particulièrement délicate. D'une part, il y a toujours un retard entre les sorties et la connaissance des réactions, qui ne sont pas faciles à déterminer. D'autre part, dans les circuits d'acheminement interviennent des organismes, des groupes divers, qui risquent de déformer ces réactions. Enfin, les responsables du système apportent les corrections nécessaires à la production de nouvelles sorties, et le cycle recommence. Ainsi, sont prises en compte les réactions humaines, et l'environnement intérieur ou extérieur au système.

L'élément rétroaction, on le voit, est essentiel au fonctionnement et à la vie du système qu'elle agisse, soit par le système lui-même, soit par l'environnement : cette vie est faite de précision, de souplesse, d'ajustement et de changement.

I.4 CONSTRUCTION ET ETUDE DE SYSTEMES

L'installation des ordinateurs dans l'Industrie, l'Université, l'Administration et l'Armée, ainsi que la découverte des énormes possibilités de ces appareils dans les sciences économiques, sociales, humaines en général, sont à l'origine des travaux et recherches récents, relatifs à la construction et à l'approche de l'étude des systèmes.

Dans l'optique des systèmes globaux, le point de départ pour le montage d'un système particulier, qu'il soit destiné à remplacer un système existant ou qu'il soit conçu de toutes pièces, est la définition des sorties. Il en est de même quand on étudie un système existant. Quels sont ses buts ? A quoi sert-il ? La réponse à ces questions est du ressort de la Direction-Gestion ou des Autorités, dont le rôle est de définir les objectifs ainsi que leurs attributs. Si par exemple, la sortie est une information, le format, l'heure et le moyen de réception, la fréquence, les modalités de

mise à jour, les bénéficiaires etc...sont à spécifier. Les sorties ne comprennent donc pas seulement le produit fini, mais tout ce qui est nécessaire à la vie et au contrôle du système comme les rapports, les listes d'erreurs etc... Les buts ou sorties principales sont fixés par la Direction et les sorties complémentaires, par les Cadres. Toutefois, l'expérience montre qu'un filtrage du nombre et du contenu des sorties complémentaires est nécessaire, l'homme ayant tendance à demander plus que l'indispensable. Les limites d'un système qui dépendent du nombre et de l'ampleur des sorties, ne sont pas faciles à tracer. Si elles circonscrivent un ensemble trop vaste, les relations fondamentales sont plus difficiles à déceler et le fonctionnement du système en souffrira. Si l'ensemble est trop étroit, des relations risquent d'être omises, alors qu'elles sont essentielles à l'étude de certains aspects du comportement du système. Ici encore, rien ne remplace le bon sens et la compétence.

Une fois les sorties définies, il convient de préciser les entrées.

Nous abordons la phase créatrice de la construction. Les entrées ne peuvent être dissociées de l'opération. Un organigramme général illustre l'agencement des sous-systèmes et chaque sous-ensemble fait l'objet d'un schéma détaillé. Le fonctionnement proprement dit de chaque système figure sur un tableau à cinq colonnes reliées entre elles par des flèches et portant respectivement comme titres : entrées, rétroactions, opérations, contrôles et sorties. Pour le système d'armes que représente un engin en vol par exemple, les entrées sont les signaux qui donnent des ordres à l'engin conformément à son programme ; les sorties sont les vitesses et directions de son programme ; l'opération est assurée par un ordinateur qui reçoit des instructions et des données, les traite et les rend assimilables à l'engin ; les contrôles sont incorporés dans le programme dont le but est de maintenir l'engin sur sa trajectoire ; la rétroaction est la transmission des données des sorties introduites comme entrées, de façon à corriger toute déviation entre la trajectoire réelle et la trajectoire calculée ou

idéale. Dès que le fonctionnement du système est représenté, le mouvement des entrées est suivi du début à la fin : pour les fournitures par exemple, il commence avec les matières premières et se termine avec la distribution des produits finis. Dans le cas de l'information, plans et instructions couvrent tout le système. Puis des tests théoriques indiquent si les résultats escomptés sont atteints. Les machines et personnel sont alors installés. La période d'instruction et de rodage commence. Les essais en vraie grandeur permettent les mises au point ; les ajustements obligent parfois à un remodelage partiel. Enfin la rédaction des instructions, des directives permanentes et de la documentation contribue à assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Le système devient progressivement opérationnel. Nous verrons que, lorsqu'elle est possible, la simulation d'un système, avant sa mise en place, apporte aux ingénieurs une aide précieuse et limite considérablement les risques.

Si un nouveau système est destiné à remplacer un ensemble existant, ce dernier est d'abord analysé dans les moindres détails, en suivant la même marche : sorties, entrées et opération. Des analyses très minutieuses ont été étudiées. Elles permettent, entre autres, de se rendre compte si les buts réels sont conformes aux objectifs définis, de détecter toutes les formes de duplication, de suivre les rouages et d'établir le prix de revient du système. On compare ensuite, cette analyse au plan du nouveau système pour déterminer si ce dernier atteindra les mêmes objectifs à un meilleur prix, s'il en atteindra d'autres et si le fonctionnement sera amélioré. Enfin, dans l'installation d'un système d'ordinateurs, la programmation, la constitution des fiches et les essais sont des phases originales qui demandent du temps, du soin et de la finesse.

L'élaboration et la mise en place d'un système connu, n'ont rien de révolutionnaire ; elles relèvent du commandement et font appel à des méthodes classiques ; elles ont l'avantage d'être codifiées.

Par contre, dans les sciences humaines en particulier, il existe une approche originale pour essayer de comprendre la nature d'un système inconnu. Elle débute par l'analyse de son comportement. La "boîte noire" en est le symbole.

Il existe dans la vie des quantités de "boîtes noires", pour chacun d'entre nous, et cet état de fait n'ira qu'en augmentant, dans un monde de plus en plus complexe. Une conductrice de voiture sait qu'en appuyant sur l'accélérateur, la voiture avance ou recule suivant la position du levier de vitesse, mais elle ignore, le plus souvent, tout de la mécanique. En pressant sur un des boutons d'un appareil de télévision des images apparaissent ; en tournant un autre, les images sont mises au point : très peu de personnes comprennent ces mécanismes.

La "boîte noire" a servi tout d'abord à analyser le comportement des systèmes électriques. Elle est utilisée, à présent, pour chaque type de système dont la structure interne n'est pas connue, le plus souvent parce que les variables sont de nature très différente et que leurs relations sont complexes. Dans cette approche, l'investigateur connaît les entrées, variables indépendantes, et observe les sorties, variables dépendantes ; l'objet de son étude est de déterminer les relations qui unissent les premières aux secondes. C'est une méthode globale, dans laquelle l'expérimentateur ne cherche plus, comme autrefois, à décomposer le système en sous-ensembles : le fonctionnement reste ce qu'il est. Son but est de découvrir statistiquement des relations susceptibles de généralisation. A cet effet, il dresse la liste des entrées et celle correspondante des sorties, c'est-à-dire les états successifs des systèmes, pour dégager les influences que les variables exercent les unes sur les autres. Quand une relation permanente est observée, il est parfois possible de la définir mathématiquement et de construire un modèle. Au fur et à mesure que s'établiront les relations, la structure du système s'éclaircira. Mais les liaisons entrée-sortie ne sont pas toujours directes, ni simples. Une combinaison d'entrées peut être à l'origine d'une sortie ou d'une combinaison de sorties. En outre, une entrée transformée peut donner naissance à une variable intermédiaire engendrant, à son tour, deux ou plusieurs sorties. En effet, le mécanisme de la "boîte" peut être compliqué et déclencher des réactions variées, qu'il n'est possible d'étudier que par un grand nombre d'observations d'états de système. Les résultats sont ainsi obtenus par des tests qualifiés d'extérieurs. Ils sont bruts et parfois plus ou moins erronés.

Ils demandent à être vérifiés par une série de tests intérieurs, c'est-à-dire concernant la structure du système dont dépendent leur stabilité, leur exactitude, en un mot leur validité. Sur ce point précis, nous verrons que les méthodes de simulation ont un rôle à jouer.

L'application de la méthode de la "boîte noire" ne suppose aucune hypothèse à la base. Un chercheur commence souvent ses expériences avec une idée préconçue, plus ou moins confirmée ou vite démentie par les faits. De plus, les limites du système à étudier sont laissées à l'initiative de l'investigateur. Les expériences pratiquées sur les animaux en laboratoire correspondent à ce mode de recherche. Enfin, cette méthode rejoint celle qui sera utilisée dans la manipulation des modèles de simulation et qui s'exprime simplement par la question : "Que se passe-t-il si ?"

Les étapes logiques de l'étude d'un système débutent par la définition de ses sorties et de ses limites ; au cours de cette phase sont précisés l'ampleur du système, son milieu, ses contraintes. Puis, la liste des entrées étant dressée, on étudie le fonctionnement d'ensemble. Ensuite, les éléments constitutifs ou sous-systèmes sont délimités et analysés à leur tour, suivant la même méthode : sorties -entrées-opération. Les facteurs affectant le fonctionnement de l'ensemble sont particulièrement recherchés. Les équations de chaque élément et du système sont établies. Enfin, composants et relations sont réunis sous la forme d'un modèle à manipuler.

I.5 QUALITES D'UN SYSTEME

Les systèmes de la nature sont imposés aux hommes qui cherchent à les comprendre et à les maîtriser. Leurs effets ne sont pas toujours liés au bonheur humain.

L'expérience prouve que les systèmes construits par l'homme doivent posséder un certain nombre de qualités dont dépend leur efficacité. Ces caractéristiques s'appellent simplicité,

souplesse, confiance dans le bon fonctionnement, économie et acceptation par les utilisateurs.

Un système simple se comprend facilement, s'apprend et se manipule facilement. Il inspire confiance car le nombre d'éléments qui peuvent tomber en panne ou se détériorer est réduit. De plus, ses frontières avec d'autres systèmes sont bien définies.

Il est évident que des changements non fondamentaux doivent être adoptés par le système. Celui-ci doit pouvoir accepter des modifications de façon à produire, par exemple, des volumes et des variétés différents d'un même produit ou d'un même service. Ce qui ne veut pas dire qu'une entreprise peut utiliser le même système pour fabriquer et vendre, à la fois, des frigidaires et des avions. Un système ne doit pas être rigide, tout changement ne devant pas conduire forcément à une construction nouvelle.

La confiance dans le bon fonctionnement de leurs appareils est une qualité fort appréciée des aviateurs. Elle varie entre les deux extrêmes 0 et 100%. Des études poussées ont été faites sur ce sujet, dans lesquelles le calcul des probabilités intervient principalement. Sont normalement définis et calculés la probabilité que le système sera en état de marche à l'instant t ., la probabilité que le système ne tombera pas en panne dans une période donnée, et le temps total moyen de fonctionnement jusqu'à la panne. Ces calculs servent à définir d'une part les matériels inspirant une très haute confiance, et d'autre part les matériels particulièrement importants pour la sécurité, qui sont à monter en double. Sont aussi précisés les probabilités de marche du système, en raison de son âge et de l'usure, les courbes de confiance en fonctionnement intermittent ou continu, les pourcentages de pannes et les temps de réparations, le nombre de pièces de rechange constamment disponibles, les temps d'entretien, les pannes à échanges standard ou à réparations etc... Toutes ces données, la plupart statistiques, varient suivant le taux d'utilisation. Elles servent à définir les règles d'exploitation et de maintenance préventive et corrective du système. Il existe, en outre, des programmes très complexes de détection de panne et de dégradation des matériels. L'ATEC, Appareillage de

Test Automatique d'Equipements Complets, construit par Sud Aviation, en est un exemple.

Un système peut atteindre son but, sans être économique. La construction d'immenses magasins, surchargés de stocks, simplifie le problème posé par un système de ravitaillement, mais le prix opérationnel d'un tel système sera sans commune mesure avec celui d'un système bien étudié, assurant un écoulement normal des fournitures conservées le moins longtemps possible, en dépôt.

Pour qu'un système fonctionne bien, il doit enfin, être admis par le personnel qui l'utilise. Il sera accepté s'il est compris et s'il est source de profit. S'il ne l'est pas, il risque fort ou d'être changé par les utilisateurs ou de ne pas atteindre son but.

Compte tenu de la complexité des choses et des hommes, la somme de ces qualités n'est pas facile à obtenir ; elle doit cependant, rester une préoccupation constante des bâtisseurs de systèmes. Ceux-ci seront plus capables d'atteindre cet idéal, si la nature les a dotés d'un bon esprit de synthèse, s'ils sont précis dans leur travail, soucieux du facteur temps, attentifs à la nécessité d'incorporer toutes les données essentielles, soucieux enfin d'étudier des rouages simples et sûrs.

I.6 LE CONCEPT DES SYSTEMES GLOBAUX

Le progrès technologique, qui est une des caractéristiques de la société moderne, apporte chaque jour des changements. Il est à l'origine de systèmes de plus en plus vastes et complexes de machines et d'hommes, créant des problèmes difficiles d'assimilation et d'adaptation. Un système d'armes, par exemple, ne comprend pas seulement les appareils de combat comme les avions, les engins, les bateaux ou les tanks, mais aussi le commandement, le personnel, les installations, le matériel de servitude et les services, nécessaires à leur mise en oeuvre et leur entretien.

Ces ensembles ne sont pas faciles à gérer : d'une part, toute décision est à prendre rapidement compte tenu de leur inertie du fait de leurs dimensions ; d'autre part toute décision fait appel à une masse de ressources et affecte une section importante de l'industrie ou de la société. De plus, on s'aperçoit que l'homme s'attache plutôt à améliorer les composants d'un grand système, qu'à découvrir leurs relations et en tirer les conséquences. Il y a de bonnes raisons à cet état de fait.

L'organisation traditionnelle des usines de production, se prête fort bien au développement des sous-systèmes indépendants poursuivant leurs buts propres, selon des critères bien spécifiques, parfois en opposition : la production recherche le coût le plus faible; le technique, cherche à se doter de la meilleure installation qui correspond souvent au coût le plus élevé; et le marché cherche la vente maximum qui ne correspond pas toujours au niveau de production.

Une autre raison tient à l'importance accordée à la spécialisation du travail, depuis bientôt un siècle. Ici, l'attention est portée sur les avantages que procure l'analyse des éléments constitutifs du système, jusqu'aux postes individuels élémentaires qui sont examinés à la loupe et améliorés grâce à des méthodes classiques, lesquelles font intervenir le chronomètre, le geste adapté, l'entraînement intensif sur le tas, etc... Par contre les méthodes synthétiques visant à améliorer le système dans son ensemble, par réunion ou combinaison de postes individuels, ou par un montage plus adapté et plus équilibré des chaînes de travail, sont relativement récentes.

Un autre facteur a empêché l'étude de système globalement. Il s'agit du manque de méthodes et de moyens. L'analyse de sous-systèmes ne fait appel qu'à des techniques connues, reposant sur des sciences anciennes comme la physique, la chimie, la mécanique etc... L'analyse des vastes systèmes s'appuie, pour une bonne part, sur des technologies et des sciences récentes, comme la recherche opérationnelle, les ordinateurs, la cybernétique etc...

Le développement des sous-systèmes s'est poursuivi d'une façon inégale, mettant encore en évidence le manque d'esprit de synthèse, dans l'étude des systèmes. L'exemple du transport de frêt par air est significatif. Ce système peut se décomposer en trois sous-ensembles : le transport par avion, le déchargement à l'aérogare, et la livraison par camion. Le premier s'est développé à pas de géant ; on le calcule en heures, les deux autres en jours. Des milliers de kilomètres sont couverts dans le premier cas, quelques dizaines de mètres et quelques kilomètres dans les deux autres. Ces différents sous-systèmes utilisent, il est vrai, des techniques différentes, entrant dans la construction des avions, le trafic aérien, le matériel de levage, le transport urbain et l'acheminement des papiers administratifs. Ce développement inégal a comme conséquence, une aggravation de l'esprit de sous-système et la création d'unités économiques indépendantes qui ont leurs buts particuliers, leurs traditions, leurs réglementations propres.

Enfin l'Etat, avec ses lois et ses règlements, n'a pas favorisé l'épanouissement du concept de système global dans l'industrie, ni dans ses propres entreprises. Il n'est pas rare en effet de voir une école ou une université neuve, trop petite ou trop grande, dès le jour de l'inauguration ; les facteurs : natalité, poussée vers l'enseignement supérieur, déplacement de personnel, transport d'élèves, etc... n'ont pas été considérés ou suffisamment appréciés. Les rentrées dans Paris par les autoroutes démontrent, chaque dimanche soir, que le système de circulation routière n'a pas été, jusqu'à présent, étudié globalement. Sur un autre plan, on voit souvent un matériel commercialisé, sans qu'on ait prévu la mise en place de pièces de rechange. Les services après vente, ne sont pas encore organisés pour satisfaire le client.

L'autre extrême, qui consiste à tout envisager globalement, a aussi ses dangers. Il existe dans toute l'Amérique du Nord un système à temps réel de réservation de billets d'avion. Tel quel, il est déjà fort complexe. Mais il offre d'autres possibilités appréciables : l'enregistrement des informations relatives aux vols irréguliers par suite des conditions météorologiques et des

problèmes d'équipement, la mise à jour du programme d'utilisation maximum et d'entretien de chaque avion, la désignation des équipages pour chaque mission, la transmission par le même circuit de messages de routine. Toutes ces additions entrent dans l'optique d'un système global. Mais ne risque-t-on pas de produire des monstres qui deviendraient difficilement opérationnels ? La construction d'un système global est non seulement affaire de possibilités techniques, mais aussi de bon sens. Dans le cas présent, il était sage de commencer par la réservation des billets, tout en prévoyant dès le départ, les possibilités d'extension du système.

La science a surtout progressé depuis plus de cent ans, grâce à des méthodes analytiques, qui réduisent les ensembles en parties élémentaires. La synthèse, d'une façon générale, a été négligée. Actuellement, les systèmes individuels sont toujours approfondis, mais l'accent est mis davantage sur le comportement de vastes systèmes considérés comme un tout. On étudie globalement des systèmes de plus en plus complexes, car on s'est rendu compte que la connaissance des relations qui unissent les différents ensembles était essentielle et source de grands profits.

Cette tendance vers la synthèse a été favorisée par l'usage des ordinateurs et accentuée par les méthodes de simulation.

I.7 CONCLUSION : L'AVENIR DES SYSTEMES

Les causes de l'évolution des systèmes construits par l'homme sont liées au progrès technologique incessant, au développement de l'économie, à l'automatisation des moyens de production, à l'utilisation courante des ordinateurs, à la tendance à rendre automatiques les systèmes d'information. Ces ensembles seront conçus semble-t-il, de plus en plus globalement; ils seront, par ailleurs, soumis à des adaptations ou changements rapides. Ces deux tendances - conception globale et rapidité de changement - ne sont guère conciliables, car il faut du temps pour transformer de vastes ensembles, mais elles rendent les modèles d'autant plus nécessaires.

Dans l'étude théorique des systèmes, la notion d'inconsistance sera creusée, sur le plan des sciences tant physiques, que sociologiques et psychologiques, de façon à vérifier le trouble apporté dans un système, par son observation.

Enfin, on pensera de plus en plus : systèmes.

II.- MODELES

INTRODUCTION

Un avion prototype est d'abord dessiné. Puis un modèle en vraie grandeur est construit en bois et contre-plaqué. Cette maquette permet d'étudier aisément les facilités d'accès nécessaires à l'entretien et aux réparations, les attaches des moteurs, les dispositions de la cabine et de la carlingue etc.. Mais elle ne représente que la forme de l'avion. D'autres facteurs, comme le poids par exemple, sont complètement négligés.

En même temps, des modèles à échelle réduite sont expérimentés en soufflerie ; puis un fuselage subit en bassin les tests de fatigue, et les premiers essais en vol commencent.

Les résultats réels sont comparés avec ceux fournis par les maquettes qui, elles, repassent en soufflerie dotées de nouveaux paramètres obtenus en vol.

*
* *

Cet exemple est significatif. Il montre bien tout le bénéfice qu'on peut tirer des modèles. C'est pourquoi nous essaierons de dégager leur caractère dans l'optique des systèmes, de les classer, d'analyser les particularités de leur construction, leurs qualités fondamentales, et de confronter leur contenu et leurs résultats avec les faits.

*
* *

2.1 DEFINITION

Dans le langage courant, les artistes ont besoin de modèles; les enfants construisent des modèles d'avions; les jeunes filles brodent d'après un modèle; l'ouvrier fond un objet dans un modèle démontable. Un point commun se dégage de ces différentes expressions : l'oeuvre n'est pas le modèle, mais elle lui ressemble.

La conception d'un modèle de système est fondamentalement la même. C'est une représentation de système, réel ou imaginé, dans le but d'expliquer et de prédire certains aspects de son comportement. Cette représentation n'est pas en tous points identique au système : si elle l'était, le modèle serait sans intérêt, car il serait aussi simple de travailler directement sur le système. En fait, *le modèle est un système formel construit, c'est-à-dire une image plus ou moins fidèle du système réel*. Cette différence tient à plusieurs causes : les lois que suit un système peuvent ne pas être toutes certaines ou connues ; par ailleurs, dans la pratique, même pour celles qui sont connues, on ne sait pas encore toutes les exprimer ; ensuite le modèle peut ne reproduire que les composants et les relations du système nécessaires au but poursuivi ; enfin le filtrage des entrées intervient dans le degré de fidélité d'un modèle.

Un même système peut être représenté par différents modèles qui ont chacun un but particulier. Un modèle n'est donc ni vrai, ni faux : sa valeur se juge à la contribution qu'il apporte dans l'explication du système représenté. C'est un outil de travail permettant l'étude de phénomènes complexes : il se substitue à la réalité qu'il simplifie.

Si le système n'est pas réel, le modèle joue le même rôle de simplification et de substitution ; dans ce cas, la distinction entre le système imaginé et son modèle est moins importante, en ce sens que le modèle peut représenter la plupart des aspects du système. D'ailleurs, le système peut être conçu d'une façon suffisamment simple, pour être incorporé en totalité dans un modèle, dont le rôle est surtout de découvrir toutes les implications des données.

Le modèle est construit pour découvrir les résultats obtenus, dans différentes hypothèses, en un mot pour être manipulé. Si la comparaison de ses résultats avec ceux du système réel est satisfaisante, il permet de prédire les réactions du système dans les conditions envisagées.

AVANTAGES ET DANGERS

Dès à présent, il est possible de discerner à la fois les avantages et les inconvénients de ce mode de recherche et de raisonnement.

Tout d'abord un modèle est un excellent outil d'analyse et de jugement. Le constructeur doit d'abord, dégager l'essentiel d'un tout complexe surchargé de détails, puis sélectionner les données significatives du système réel à incorporer dans le modèle. Quand le problème peut s'exprimer en formules mathématiques, le langage des symboles offre de grandes possibilités, analytiques et synthétiques.

Enfin un modèle est un moyen bon marché d'étudier un problème difficile et une méthode qui a fait ses preuves.

Cependant, la construction et la manipulation des modèles ont leurs dangers. Le premier est d'ordre psychologique. Un chercheur s'attache à son modèle, au point de le considérer comme le système réel lui-même. Parfois, il ne s'étonne même plus des écarts entre ses prédictions et les faits, pour autant que son modèle soit logique et consistant avec lui-même : telle est l'optique d'un savant qui se coupe du monde réel.

On risque par ailleurs de trop simplifier le système, afin de le soumettre aux contraintes de la mathématique. C'est une tendance naturelle ; mais le retour périodique à la réalité dissipe ce danger, car si le modèle ne prédit pas valablement, il n'atteint pas son but et doit être amélioré ou changé.

Enfin, compte tenu de l'évolution actuelle, les modèles sont vite dépassés. Un modèle ancien, déjà adapté à la réalité, peut être surpassé par un plus récent, mieux élaboré et utilisable dans un secteur plus vaste. Il est dangereux de conserver de vieux modèles, par routine, en particulier dans le domaine des affaires.

Il sera plus facile d'éviter ces écueils en appliquant ces deux règles d'or :

- Un modèle n'est ni vrai ni faux.

- Le critère de comparaison des modèles est utilitaire : le meilleur étant celui qui fait du monde réel les prédictions les plus précises.

2.2 CLASSIFICATIONS

Il existe plusieurs façons de classer les modèles. Distinguons en premier lieu, les modèles physiques et abstraits.

Les premiers sont des maquettes à échelle réduite et représentent la terre, une maison, un appartement, un pont, un bateau, un avion, une scène de théâtre, un système d'adduction d'eau, etc... Ils sont faciles à comprendre et se prêtent à une certaine manipulation. Dans la maquette d'un atelier par exemple, les machines sont reproduites à la même échelle pour étudier leur disposition. On tient compte uniquement des formes et des tailles pour calculer l'espace nécessaire autour des machines; le fonctionnement n'intervient pas dans le cas considéré. L'emplacement des machines est modifié pour étudier les différentes dispositions possibles des ateliers. La prévision à partir des modèles physiques se fonde, à la fois, sur l'expérimentation et le jugement. Le coût est fonction de la complexité.

Les maquettes d'avions sont manipulées en soufflerie, et celles de bateaux en bassins de carènes. Les résultats obtenus sont corrigés par des facteurs de réduction et d'équivalence estimés ou calculés. Ces essais n'éclairent donc pas sur les performances exactes. L'expérience prouve, néanmoins, qu'elles sont suffisamment précises pour dégrossir le problème.

Les modèles physiques sont utilisés, en outre, comme aides à l'instruction, par exemple, pour expliquer les mécanismes et les circuits des moteurs, pour faire comprendre le phénomène des éclipses etc...

Il existe aussi des modèles physiques analogiques. Un circuit hydraulique fait comprendre un circuit électrique. Des composants électriques sont associés pour monter un ensemble réagissant comme un système mécanique, les variables du circuit électrique étant assimilées à certaines variables du système : ainsi un ordinateur analogique est construit pour étudier le fonctionnement d'un système de distribution d'essence ou d'une usine de raffinerie de pétrole.

Ces modèles présentent certains avantages sur les modèles physiques ordinaires : ils sont plus généraux, plus faciles à modifier, et capables de reproduire des situations changeantes.

Les modèles abstraits sont établis à partir de symboles : images, mots, équations, représentant à la fois les composants et les relations qui les unissent entre eux.

Les schémas sont utilisés depuis longtemps. Toujours accompagnés d'explications, ils sont descriptifs et statiques. Graphiques et courbes sont, en plus, des modèles analogiques, car les distances sur l'axe des x ou des y peuvent représenter aussi bien des francs, des temps, des unités de production, des âges, des poids, des pourcentages etc ...

Les modèles littéraires ou descriptifs ont une possibilité que l'image n'a pas, celle d'analyser les relations entre les composants, dans un langage courant. Ils abondent dans les sciences sociales et politiques : dans ce cas, les groupes d'individus sont les composants. Le modèle littéraire a une construction logique, qui se prête à la déduction donc à la prédiction. Comme il ne comprend ni mesures, ni calculs, on conçoit qu'il ne soit pas très précis et qu'il puisse s'éloigner considérablement de la réalité. C'est une méthode de pronostics bon marché, mais la logique n'est pas toujours suffisante, ni le jugement très sûr, en particulier dans des situations compliquées et en évolution rapide.

En fait, chacun dans son propre monde, utilise largement ces deux types de modèles descriptifs.

Les modèles mathématiques comprennent des variables qui identifient objets et propriétés du système étudié ; les relations entre ces facteurs sont décrites sous la forme de fonctions mathématiques et logiques. Ils sont donc réduits à un groupe d'équations qui structurent les relations et variables du système ; les solutions reflètent ses différents états. Le modèle original ne change pas. Les états divers du système proviennent des changements et des combinaisons de relations et de variables, au sein des équations. La manipulation d'un tel modèle est donc directe et commode.

Mais pour établir une équation représentative, une analyse précise et quantitative de la situation s'impose. C'est pourquoi le modèle littéraire se traduit difficilement en formules scientifiques. En outre, toutes les situations, tous les facteurs ne sont pas mesurables, en particulier chaque fois que l'homme intervient. C'est surtout par manque d'unités de mesures, que la construction de modèles mathématiques est difficile dans les sciences humaines.

Enfin, les modèles mathématiques ont cet autre avantage de pouvoir être comparés entre eux aisément.

Quand le modèle est une construction mathématique réussie, son fonctionnement est peu coûteux et les prédictions conduisent, dans les hypothèses du modèle, aux meilleures performances, comme par exemple, au plus grand bénéfice. C'est rarement le cas dans les grands systèmes complexes, car aucune théorie mathématique ne permet de résoudre complètement leurs problèmes. Mais il est parfois possible de trouver par approximations numériques, des méthodes qui donnent des solutions proches des meilleurs résultats, comme par exemple la programmation linéaire, la programmation dynamique, la manipulation des calculateurs analogiques, la méthode statistique de Monte-Carlo... Ces méthodes sont coûteuses car elles nécessitent des durées importantes d'utilisation d'ordinateurs.

La construction des modèles fera mieux apparaître la distinction entre les modèles mathématiques, déductifs ou aléatoires, qui reflètent la nature des systèmes étudiés. Dans le premier cas, aucune des variables n'est aléatoire et les relations sont des fonctions exactes. Dans le deuxième cas qui est beaucoup plus compliqué, au moins une des relations est déterminée par une fonction de probabilité. Un modèle déductif devrait théoriquement conduire à des solutions optimum. En effet, les conditions de son fonctionnement sont définies et fixes. Par ailleurs ses sorties sous la forme de prix, de profits, de temps, etc... peuvent être comparées à des standards de rendement.

En fait, le cas n'est pas fréquent, car les relations entre composants et variables sont complexes et ne sont pas reproduites en totalité ou exactement par les fonctions mathématiques.

Le plus souvent, les systèmes contiennent une bonne part d'incertitude, prise en compte par les modèles aléatoires, dont les solutions sont aussi marquées par le hasard. De tels modèles ne produisent pas de solutions optimum, par le fait même de leurs éléments aléatoires. Presque tous les systèmes d'hommes et de machines sont de ce type.

Depuis la mise en service des calculatrices électroniques, il existe des modèles pour ordinateur, mathématiques ou non, qui sont écrits selon un ensemble de règles et dans un langage particulier, afin qu'ils puissent être assimilés et manipulés commodément par l'appareil. Leurs qualités et leurs possibilités sont grandes. Tous les problèmes, en effet, ne peuvent être traduits sous une forme mathématique. Néanmoins, il est possible de faire entrer un bon nombre d'entre eux dans des modèles logiques, appelés aussi modèles de procédure, ou modèles de simulation. Ceux-ci sont des abstractions directes de la situation réelle : Ils sont donc faciles à comprendre, mais leur élaboration demande beaucoup de minutie. Les modèles de file d'attente en font partie ainsi que les modèles d'équilibrage de chaînes dans les usines de fabrication.

Prenons l'exemple d'un atelier à plusieurs postes de travail consécutifs, aux temps de travaux variables. Dans ce cas, un modèle descriptif ou mathématique, employé pour rechercher les meilleures bases de production, ne donne pas de résultats valables. On les obtient avec un modèle logique. Sa construction comprend trois phases. La première consiste à organiser les données sous forme de tableaux qui décrivent l'atelier : tableaux de marche pour conserver la trace des travaux en cours, tableaux d'événements, tableaux de l'état des machines, tableaux d'attente pour conserver la trace des travaux en attente devant chaque machine, tableaux de production où sont accumulés les renseignements sur les rendements de l'atelier etc... Durant la deuxième phase et grâce à ces tableaux, l'activité de l'atelier est représentée sous la forme d'un organigramme, qui comporte la désignation précise des données utilisées et la séquence dans laquelle toutes les opérations numériques et logiques sont accomplies - Figure 2,1 -

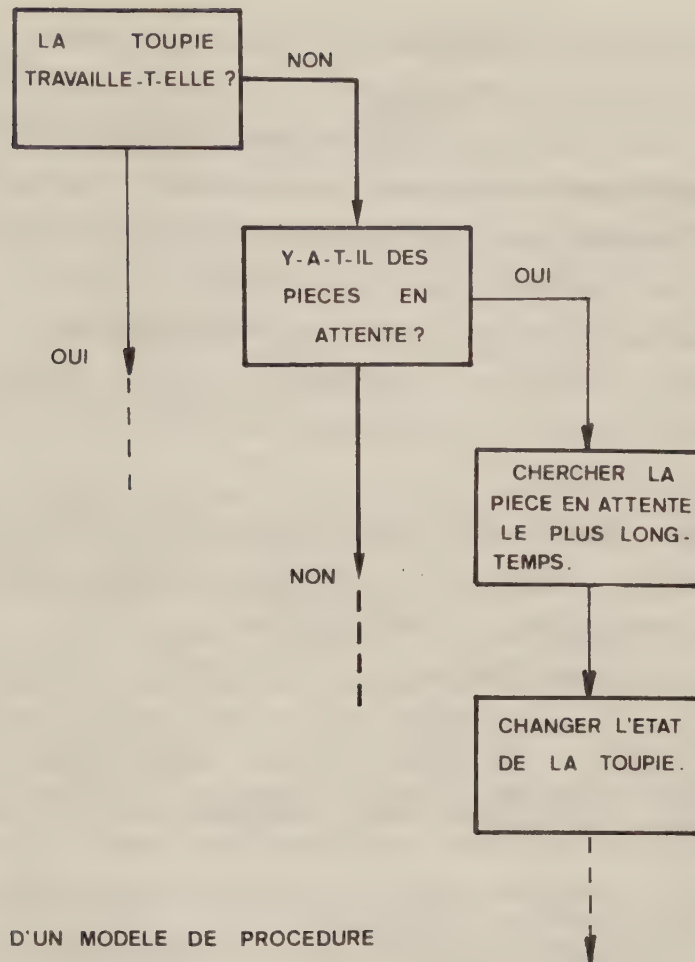


FIGURE 2-1 FRAGMENT D'UN MODELE DE PROCEDURE

La troisième phase est réservée à la traduction de l'organigramme en données assimilables par l'ordinateur ; autrement dit, un programme d'ordinateur est rédigé pour exécuter le modèle, en suivant pas à pas l'organigramme. C'est ainsi que seront calculés des paramètres que l'on ne pouvait mesurer autrement, comparées différentes solutions, et trouvée une des meilleures façons de faire fonctionner l'usine.

Comme les modèles aléatoires et à l'inverse des modèles déductifs, les modèles logiques ne donnent pas la meilleure solution du problème, mais celles qui correspondent à des changements de valeur des variables. Nous verrons que les modèles de simulation sont souvent, à la fois mathématiques et logiques.

Les modèles reçoivent aussi les mêmes qualificatifs que les systèmes qu'ils représentent : ils sont industriels, économiques, logistiques, sociaux, politiques etc... Ils sont aussi, statiques ou dynamiques, stables ou instables, ouverts ou fermés, durables ou évolutifs. Un modèle est statique ou dynamique selon que les relations ne varient pas ou changent avec le facteur temps ; la plupart des modèles statiques sont déductifs.

Il est stable ou instable si à la suite d'une perturbation, il revient ou non à son état initial ; les modèles statiques sont toujours stables.

Il est fermé s'il fonctionne sans tenir compte de variables élaborées en dehors du modèle. Il est ouvert si ses sorties dépendent de variables incontrôlables.

Enfin il est durable ou évolutif, s'il se répète ou non, en conservant un comportement qui n'est pas nécessairement identique mais similaire. Le modèle d'une industrie en croissance est évolutif. Celui du marché des automobiles en Europe semble être durable.

Un même modèle n'est pas à la fois statique et évolutif car ces deux caractéristiques sont incompatibles, par définition.

Ces différentes classifications peuvent être combinées. Ainsi, un modèle industriel peut être mathématique, aléatoire, dynamique, stable et durable.

Un modèle est partiel ou général, en raison de son champ d'observation et d'application. Le modèle d'une entreprise est partiel, celui de toute une industrie est général. En pratique, ce sont les premiers qui sont les plus développés, car ce sont les plus faciles à édifier.

Sur le plan philosophique, un modèle est assimilé à une hypothèse, à une théorie, ou à une loi, suivant son degré d'adaptation. Au départ, un nouveau modèle est une hypothèse ; puis au fur et à mesure que les tests donnent satisfaction, il devient une théorie. A partir du moment où toutes les solutions sont toujours vérifiées par les faits, c'est pratiquement une loi. En réalité, un modèle réussi est une quasi-théorie.

LES DEUX VOIES DE TRAITEMENT D'UN MODELE

En définitive, dans le domaine de notre étude, il existe pratiquement deux voies pour construire et manipuler un modèle :

- *la voie mathématique*
- *la voie de simulation*

Dans le premier mode, les lois individuelles des composants et les lois d'interconnexion sont exprimées mathématiquement pour assurer un traitement mathématique complet. Quand on parvient à une formulation relativement simple, il est aisé d'analyser l'influence des facteurs. C'est là le grand intérêt de la méthode.

Ce n'est certes pas le cas général. Le plus souvent le système est complexe et la construction du modèle oblige soit à des réductions ou simplifications de lois, soit à des représentations analytiques de lois par ajustement à des données expérimentales. Enfin, pour sortir rapidement le résultat analytique et en tirer quelque chose d'utile, la puissance d'un ordinateur et les ressources de l'analyse numérique sont le plus souvent nécessaires.

La deuxième façon de traiter un modèle est celle de la simulation; elle permet en particulier de suivre pas à pas les composants et leurs relations, sans les intégrer dans une description d'ensemble. Elle supplée au traitement mathématique quand la formulation devient trop complexe ou que son exploitation est inextricable.

Il est bien évident que la méthode de simulation des systèmes fait appel à ces deux modes de traitement des modèles, ou séparément ou conjointement, dans la recherche de la plus fidèle représentation du système.

2.3 CONSTRUCTION D'UN MODELE ECONOMIQUE

Prenons l'exemple d'un modèle économique. Ce type de modèle comprend : les composants, les variables et les relations fonctionnelles.

Les composants se répartissent en plusieurs catégories comme les centres de décision, les marchés, les produits etc... Les premiers s'identifient aux individus, aux familles, aux usines, aux banques, aux syndicats, aux administrations gouvernementales Marchés et produits sont aussi diversifiés.

Les variables qualifient les composants. Il est d'usage de les classer en trois : variables d'entrée, variables de sortie et variables internes. Les variables d'entrée sont parfois appelées exogènes, ou incontrôlables, ou indépendantes, pour bien montrer que le système n'a aucune influence directe sur elles. Elles agissent sur le système. Toutefois certaines peuvent être changées, comme le nombre des ouvriers qui travaillent dans une usine, tandis que d'autres, issues du milieu, sont inadaptables, comme l'imposition sur les revenus.

Les variables internes, dites aussi contrôlables, décrivent l'état des composants ; pour un individu, elles concernent l'âge, le sexe, l'état civil en général, l'éducation, les revenus etc... ; dans une entreprise, elles s'appellent inventaires, bilans etc... Les variables de sortie, nommées aussi endogènes ou dépendantes pour indiquer qu'elles sont le produit du modèle, dépendent à la fois des variables d'entrée et internes, et aussi de leurs relations. Elles intéressent dans l'industrie la production, les ventes, les prix, la main d'oeuvre etc...

Une variable entre dans l'une des trois classifications selon le but de la recherche. Par exemple, les impôts sont classés, dans un modèle de l'Administration des Finances, comme variable interne, mais dans un modèle d'entreprise particulière, comme variable d'entrée. De plus, les variables de sortie d'un modèle peuvent devenir, sans changement, des variables d'entrée d'un autre modèle. De même, par le mécanisme de rétroaction, une variable d'entrée incorpore parfois une partie d'une variable de sortie.

Outre les composants et les variables, interviennent les relations fonctionnelles, qui définissent la façon dont les variables sont liées les unes aux autres. Elles comprennent les identités et les relations de fonctionnement.

Les premières sont des tautologies introduites pour la facilité des calculs, comme par exemple celle qui indique que le prix de revient est égal au prix d'achat plus les frais.

Les secondes montrent par quelles relations les variables internes et d'entrée produisent les variables de sortie. Les relations de fonctionnement ne sont pas observables : elles expriment une hypothèse, le plus souvent sous la forme d'une équation obtenue par l'étude des statistiques : telles sont les équations de production, d'investissement Les relations de fonctionnement peuvent être aussi des fonctions aléatoires. Les compagnies d'assurance sur la vie, par exemple, réussissent à prédire assez exactement le nombre de leurs assurés qui mourront dans l'année, et même leur âge. On comprend que ces relations de fonctionnement, qui sont à découvrir par des méthodes inductives, jouent un grand rôle dans la prédiction des modèles.

On a coutume d'appeler paramètre un facteur qui reste constant pendant toute la simulation : sa valeur est définie initialement.

A titre d'illustration, voici le modèle simplifié du sous-système Elevage de PORCS de l'application qui suit cette étude et qui concerne la Simulation d'un Groupement de Coopératives Laitières.

Paramètres : Rations de sérum et de babeurre.

Variables d'entrée - Pendant la période t -

PB_t = Production de babeurre de la laiterie

PS_t = Production de sérum de la laiterie

Variable interne - Au commencement de la période t -

NPO_t = Nombre de porcs occupant la porcherie

Variables de sortie - Pendant la période t -

NPV_t = Nombre de porcs vendus c'est-à-dire engraisés

NPA_t = Nombre de porcelets achetés

Relations

$$\text{Identité : } NPO_{t+1} = NPO_t + NPA_t - NPV_t$$

Relations de fonctionnement

$$1 \quad NPV_t = NPA_{t-24} - F(NPA_{t-24})$$

$$2 \quad NPA_t = F(NPO_t, PB_t, PS_t)$$

Un modèle simplifie la réalité mais il n'a de valeur que s'il arrive à prédire les faits. Les retours à la réalité au cours de sa construction sont donc impératifs, comme le montre le schéma suivant - Figure 2,2 -

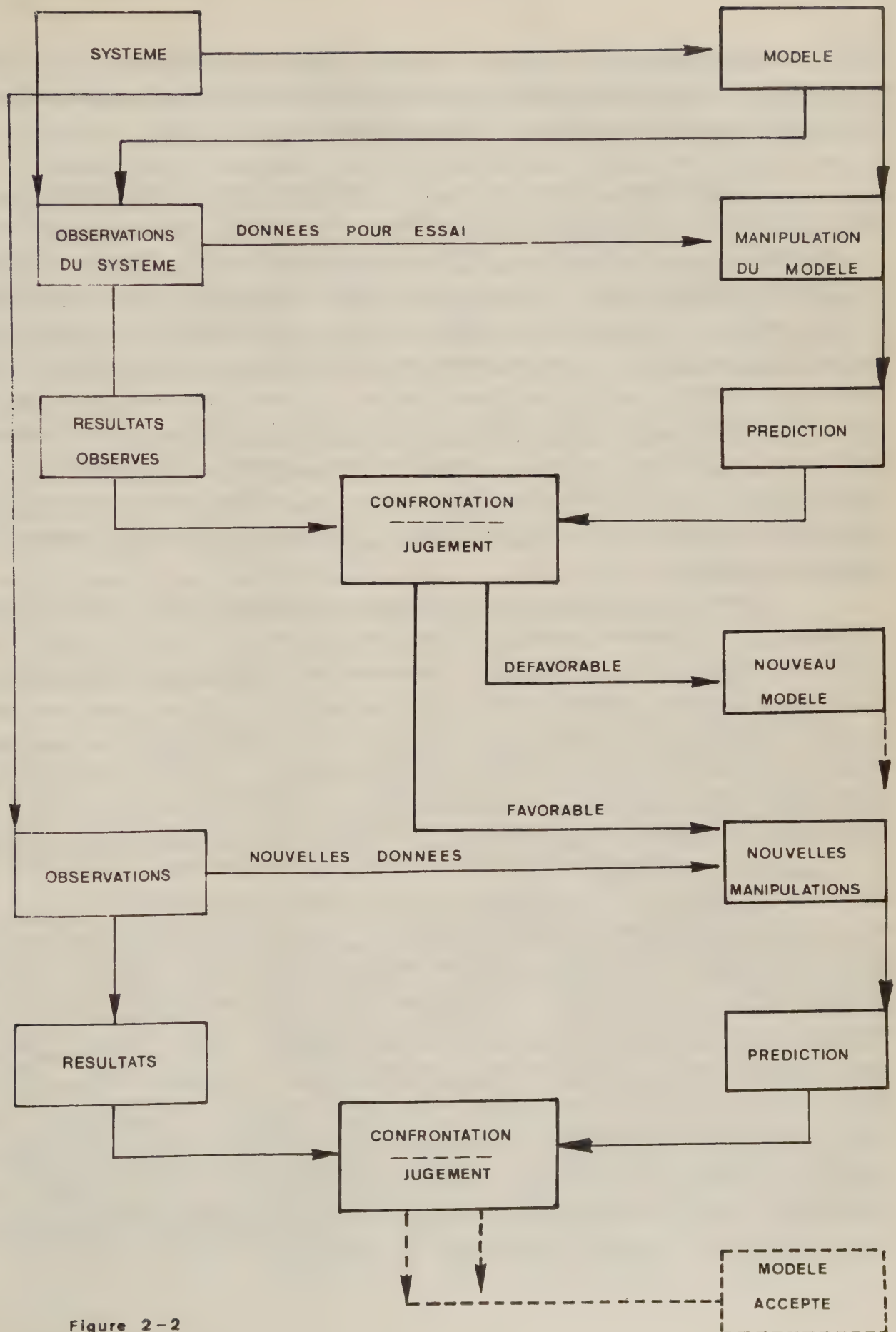


Figure 2-2

Ce schéma n'a certes rien de révolutionnaire. Il est déjà appliqué depuis longtemps, dans les sciences physiques en particulier. Sa valeur découle de sa généralité.

Les étapes logiques de la construction d'un modèle suivant celles de l'analyse des systèmes comportent, nous l'avons vu, la délimitation du système, l'identification de ses éléments constitutifs fondamentaux, l'analyse de ses composants et la synthèse finale sous la forme d'une construction de modèle. Il est donc normal de retrouver, comme première étape de la construction d'un modèle, la définition du système étudié. Il peut arriver qu'à cette fin, un modèle soit déjà nécessaire pour identifier les éléments et leurs relations : c'est la période des schémas, des graphiques, des figures avant la mise en équations. Ce modèle préliminaire est avant tout descriptif. Il peut être construit analytiquement ou synthétiquement.

Dans le premier cas, le travail commence par le bas : les éléments du système sont pris les uns après les autres, puis reliés entre eux. Cette méthode présente le désavantage d'aboutir souvent à de très grands modèles et de mettre l'accent sur les détails. Dans le deuxième cas, le point de départ est le système dans son ensemble, qui est ensuite décomposé. L'expérience prouve que cette façon de faire est préférable, car elle évite de mettre trop en évidence les sous-systèmes, au détriment des performances d'ensemble du système.

Les étapes suivantes comprennent, tout d'abord, la définition des mesures, permettant d'évaluer les performances d'ensemble du système : en unités ou en tonnes pour une production, en francs pour un profit etc..., puis la conception d'un modèle, dans lequel ces mesures pourront être exprimées sous la forme d'une fonction de variables définissant le système, ensuite l'identification des variables d'entrée et internes, enfin la recherche des valeurs de ces variables qui conduisent aux meilleures performances du système s'il s'agit d'un modèle déductif, ou l'étude des variations des performances suivant les changements de variables, s'il s'agit de modèles aléatoires ou logiques.

Ces deux derniers modèles sont parfois considérés comme inférieurs, en raison de leur inaptitude à découvrir la meilleure solution. Cette opinion est fausse, car c'est le type de système qui détermine le modèle ; en voulant à tout prix bâtir un modèle déductif, on risque d'aboutir à de graves erreurs. C'est ainsi que la programmation linéaire est parfois mal utilisée : les fonctions coût et ressources par exemple peuvent fort bien ne pas être linéaires. En imaginant, dans les problèmes de production, que la fonction "demande future" est connue et constante, il est possible de concevoir un modèle déductif ; mais en fait cette "demande" est aléatoire.

Dans certains cas, grâce à des hypothèses de simplification, un modèle peut donner la meilleure solution, laquelle n'est pas forcément la meilleure pour le système. Parfois, ces hypothèses ne sont plus nécessaires, quand on construit un modèle aléatoire ou logique, qui représente le même système avec plus de fidélité, compensant ainsi son inaptitude à trouver l'optimum.

2.4 QUALITES D'UN MODELE

Réalité et simplicité sont les mots clefs des modèles. Le modèle, en effet, sert à l'intelligence du système et à la prévision de son comportement. Sa première qualité est donc de fournir des prévisions les plus proches possible du monde réel. Nous reviendrons, sans cesse, sur ce caractère fondamental.

La seconde qualité est la simplicité. Il existe des modèles composés de milliers, de dizaines de milliers d'équations. Les difficultés rencontrées sur des modèles plus réduits montrent qu'il est sage d'éviter de tels "monstres". Sur le plan théorique, un modèle comportant 100 équations donne la possibilité de trouver 100^{100} solutions, si 10 changements de variables interviennent dans chaque équation. Il est dès lors difficile de faire un choix. Par ailleurs, dans ces gros modèles, il y a le risque de ne plus reconnaître les variables importantes dont l'influence est déterminante sur le comportement du modèle ; elles sont, en effet, perdues au milieu de centaines d'autres marginales.

Il existe une tendance à incorporer dans un modèle le plus possible du contenu du système, comme si sa complexité garantissait de meilleures prédictions. Dans ce cas, le modèle est aussi difficile à comprendre que le système, bien qu'il puisse être manipulé et observé. Alors, il n'atteint pas son but qui est de simplifier la réalité pour la comprendre et la prédire. Enfin l'expérience a montré qu'un modèle à 5 équations - 1 identité et 4 relations - arrivait pratiquement à des résultats supérieurs à ceux d'un très grand modèle, dans la prédiction à court terme du produit national brut d'un pays, (3,19), et qu'un modèle simplifié à 6 équations expliquait correctement les tendances commerciales d'une nation au cours d'une période de 20 ans.

Autrement dit, le choix et la manipulation des paramètres essentiels d'un modèle sont plus difficiles à faire, quand une très grande quantité de variables de deuxième et de troisième importance sont introduites dans l'analyse. La simplicité d'un modèle se mesure à la concentration et à la priorité donnée à un nombre restreint de variables fondamentales, celles-ci étant plus faciles à déterminer, manipuler et changer. Dans cette optique, un nombre considérable de variables marginales peuvent être ajoutées à ce noyau, les ordinateurs s'en accommodant fort bien.

2.5 MODELES ET REALITES : LES HYPOTHESES

La tâche qui consiste à simplifier un système pour créer un modèle est délicate. Elle demande une connaissance approfondie du système et une grande puissance d'analyse. Ce qui est inclus dans un modèle est fondamental, car la manipulation ne joue que sur son contenu. Cette simplification du réel peut se faire de deux façons : par élimination et par concentration.

Quand on élimine des composants ou des variables, on suppose que leur comportement est une constante.

Le deuxième mode de simplification consiste à rassembler plusieurs variables ou éléments en un seul. Mais la question se pose de savoir si l'on peut faire confiance à un modèle qui s'éloigne autant de la réalité ? Il est vrai qu'un modèle ne prétend pas expliquer le comportement complet d'un système, mais de certains aspects seulement. En outre, si les conclusions du modèle

concordent avec les observations passées ou présentes du système, il y a de fortes chances pour qu'elles continuent à correspondre dans une situation future, les observations du système servant de test. Par ailleurs, l'expérience prouve que les progrès scientifiques sont souvent le fruit du travail sur des hypothèses simplifiées, plutôt que sur des ensembles complexes.

On conçoit cependant qu'un Directeur d'entreprise, ayant une grande expérience de son affaire, mais peu versé dans la pratique des modèles, manifeste certaines réticences devant leurs prédictions.

En fait, un modèle n'est pas conçu pour prédire une situation réelle dans tous ses détails. Le juge impartial de sa valeur et de son rendement est le monde réel. Qu'il ne s'avère capable que d'orienter, que de donner une confirmation, ou une indication, serait déjà précieux :

La construction d'un modèle par simplification d'un système repose sur des hypothèses. L'énumération de celles qui interviennent dans quelques constructions montrera l'écart voulu ou nécessaire au départ, entre la réalité et l'abstraction.

Prenons d'abord l'exemple d'un modèle de machine prototype à commande numérique, guidée par un ordinateur et destinée à être utilisée dans la métallurgie (1,13). Son auteur a fait, consciemment ou non, les hypothèses suivantes que nous avons relevées tout au long de son étude :

- L'ordre d'exécution du travail coïncide avec l'ordre préparatoire qui est normalement communiqué au chef d'atelier, une dizaine de jours avant le début du travail, de façon à ce que matières premières et l'outillage nécessaires soient en place en temps voulu.
- Le modèle ne prend en considération que le débit de la seule machine outil, n'envisageant ni la suite des opérations, ni en particulier le cas où les pièces fabriquées seront reprises immédiatement par une autre machine.
- La possibilité d'exécuter les commandes en utilisant deux ou plusieurs machines, de façon à gagner du temps, n'est pas considérée.

- Le pourcentage de commandes nouvelles représente 65% de la production, et celui de renouvellement de commandes, 35%.
- Les matières premières sont toujours en place, en temps voulu et les déchets, dûs à des erreurs de fabrication, n'entrent pas en ligne de compte.
- Aucun problème de personnel ne se pose.
- Heures supplémentaires et travail par équipes successives ne sont pas envisagés.
- Le modèle ne prévoit ni le cas d'un embouteillage, ni celui d'une panne mécanique.
- Il ignore les problèmes de graissage de la machine, d'entretien préventif, d'inspection du matériel, de saturation de l'aire de stockage.
- Le temps de correction de cartes perforées est standard, quels que soient l'heure de la journée et le type de corrections.
- La priorité du "premier arrivé premier servi" est respectée tout au cours de l'étude.
- Les données de base proviennent de statistiques accumulées pendant plusieurs années, dans des usines métallurgiques similaires traitant des problèmes analogues, dans l'industrie spatiale et les centres de recherche.
- En outre, la construction mathématique du modèle ne doit pas comporter plus de 50 variables, de 8 paramètres dans chaque instruction, de 1000 instructions en circulation, compte tenu des possibilités du langage de programmation dans lequel il sera traduit.

Un des buts recherchés par l'auteur était la constitution d'un ensemble de données statistiques, sur le fonctionnement et le rendement de la machine automatique, ainsi que la comparaison de ses résultats avec ceux des machines conventionnelles effectuant alors, dans l'usine, le même travail.

La plupart des hypothèses relevées dans l'étude précédente intéressent le système lui-même : mais d'autres peuvent être faites sur l'environnement et au cours de la construction du modèle. C'est ainsi que le modèle d'une industrie nationale de contre-plaqué a été bâti, en tenant compte des hypothèses ci-après (1,37) :

- L'industrie nationale n'est affectée, ni par la production des usines étrangères sur le sol national, ni par l'importation de contre-plaqué, toutes deux étant estimées sans influence appréciable, du fait de leur faible pourcentage dans la consommation totale.
- Le marché du contre-plaqué est, d'une part, indépendant de celui des produits compétitifs en bois ou en plastique, car les prix des produits en contre-plaqué sont les plus bas.
- Il est, d'autre part, sans effet sur le prix de la matière première : le bois brut est considéré comme une variable indépendante, ses utilisateurs étant très nombreux.
- Le marché du contre-plaqué à surface polie est indépendante de celui à surface brute.
- Les utilisateurs de contre-plaqué sont considérés comme une variable indépendante, qui est déterminée par le niveau de vie économique du pays, et qui n'est pas influencée par le marché lui-même.

Ces propositions ne sont pas le reflet de la réalité, mais elles sont estimées comme ayant une influence négligeable dans un premier temps, de façon à faire un modèle plus simple.

Les hypothèses de construction sont également, bien communes. Il existe à présent des types de modèles, couramment utilisés, aux méthodes et techniques éprouvées : modèle de files d'attente, d'inventaire, de production, de plan de travail etc... Une tendance bien naturelle chez un constructeur de modèle consiste à faire entrer son problème ou son système dans l'un de ces modèles. Il profite ainsi de toute la méthodologie et des techniques du modèle. Un système de transport, par exemple, est assimilé à un problème de file d'attente (1,48). Cette façon de faire est recommandable, à la condition de dresser la liste des hypothèses qui autorise une telle comparaison.

En outre, dans la construction elle-même, des hypothèses ou approximations sont faites, en particulier au cours de l'analyse des données réelles et des résultats de la manipulation du modèle, qui reflètent rarement des formes ou expressions mathématiques théoriques. Les entrées et les durées de traitement, ou de

séjour, ont été interprétées de la façon suivante dans un modèle d'hôpital (1,8). Les entrées journalières de malades sont réparties, parfois selon une distribution de Poisson, mais le plus souvent suivant une distribution négative binomiale : pour la simplicité du modèle, seule cette dernière a été conservée. La durée des diagnostics est représentée, la plupart du temps, par une fonction de probabilité gamma, celle des soins et la durée totale de séjour à l'hôpital, par des distributions logarithmiques.

L'énumération des hypothèses faites au cours de notre application montre qu'elles sont nombreuses et sujettes à variations.

PLAN AGRICOLE

1. Maintien de la qualité du lait tout au cours de l'année, particulièrement en période de sécheresse, par apports d'aliments complémentaires, de façon à éviter des baisses brutales de vente du fromage.

2. Accroissement annuel de la production de 2 % de 1972 à 1992.

3. Achat de laits extérieurs lié au maintien du fonctionnement actuel des autres fromageries du département.

PLAN ORGANISATION

4. Soudure assurée entre les départs de porcs engraisés et les arrivées de porcelets.

5. Constitution et maintien d'un stock de sécurité d'aliments du bétail l'hiver, pour éviter des ruptures de stocks pendant les périodes de tempêtes de neige.

6. Surveillance vétérinaire permanente du cheptel pour échapper aux épidémies généralisées.

PLAN COMMERCIAL

7. Maintien des possibilités d'exportation et d'un régime d'offres et de demandes.

8. Surveillance de l'évolution des marchés pour profiter de toute occasion favorable.

PLAN PSYCHOLOGIQUE ET SOCIAL

9. L'accord de tous les cultivateurs du canton pour s'associer est obtenu avant 1971. Aucune scission n'intervient par la suite.

10. Le paiement du lait à la qualité est admis par tous les adhérents.

11. Le personnel actuel des fromageries accepte de se reconvertir et de jouer le jeu dans la nouvelle organisation.

12. La participation de tout le personnel aux bénéfices de la coopérative est approuvée et définie suivant des normes consenties.

HYPOTHESES DE TRAVAIL ET APPROXIMATIONS

13. Ont été admises :

- Les normes du Génie Rural pour le calcul du personnel nécessaire à la nouvelle fromagerie.

- Les formules du Fonds d'Orientation et de Régulation des Marchés Agricoles pour le calcul de la tonne-kilomètre et pour le coût de collecte des laits extérieurs dans une région à haute densité laitière.
- Les normes du Génie Rural et d'une Coopérative de Langres pour le calcul des données concernant l'affinage.
- Les données expérimentales d'un centre de collecte du lait en Haute-Marne pour le calcul du nombre de chauffeurs et de camions nécessaires au plan de ramassage.
- L'augmentation des frais de fonctionnement proportionnellement aux tonnages de laits extérieurs collectés.
- Les évaluations des chalets et du matériel existants par les présidents de fromageries.
- L'implantation en 1972 d'un centre d'ordinateurs travaillant en temps partagé au chef-lieu d'arrondissement ou de département.

14. La production journalière moyenne d'une fromagerie au cours des années 1966 et 1967 estimées significatives sert de table numérique pour générer la production simulée du canton.

15. Les normes de fabrication sont ajustées pour tenir compte des données pratiques d'une fromagerie locale considérée d'avant-garde.

16. Les tests d'hypothèse sont appliqués à la production d'une ferme jugée représentative et à celle d'une petite coopérative.

17. Le modèle des prix est établi d'après les cours pratiqués en 1968. Les frais de fonctionnement de certaines coopératives incapables de les fournir sont calculés en prenant comme base la moyenne des autres.

18. La constitution des groupements est empirique et ne repose pas sur l'analyse des laits.

19. Les fromages fabriqués avec des laits de mélange sont de bonne qualité.

20. La capacité de la porcherie est déterminée par l'utilisation d'une ration à haute dose de sérum.

21. Le montant des frais d'engraissement repose sur des statistiques nationales et internationales. Le taux de perte et la durée d'engraissement sont des données locales, en porcherie traditionnelle.

PLAN DES ETUDES

22. Enfin, la simulation présentée suppose un certain nombre de travaux complémentaires, pour prendre son entière signification.

Ces quelques exemples montrent tout d'abord, que de nombreuses hypothèses sont nécessaires, quand on cherche à simplifier une situation réelle. Ils mettent aussi en évidence, que la définition des objectifs du modèle est primordiale, car elle conditionne non seulement le nombre et l'ampleur des hypothèses, mais aussi la simplicité du modèle. D'autre part, certaines contraintes et limitations sont imposées par les conditions de manipulation du modèle. Si l'on tient compte de toutes ces restrictions et approximations, les résultats obtenus sont comparables entre eux, mais ils ne semblent pas en rapport logique étroit, avec les données présentes et futures du monde réel, et exigent alors une interprétation minutieuse. Celle-ci demande, outre une grande compétence afin de peser et d'évaluer dans quel sens et avec quelle force, seraient intervenus les facteurs négligés ou arrondis, de l'objectivité pour ne pas essayer de superposer à tout prix l'abstrait et le réel, et enfin, beaucoup de bon sens et de jugement.

Un modèle peut rester valable sur le plan formel et ne plus atteindre les objectifs réels fixés par son constructeur. Pour éviter cette anomalie, il est nécessaire de surveiller constamment les paramètres et surtout leurs valeurs extrêmes; autrement dit il faut s'assurer que les hypothèses initiales sont toujours bien remplies car tout changement limite la validité du modèle.

2.6 CONCLUSION

Le modèle est à mi-chemin entre les méthodes empirique et spéculative : c'est un schème. En effet, ses bases appartiennent au monde réel, sa manipulation est théorique, ses résultats n'ont de valeur que s'ils sont confirmés par les faits.

Par ailleurs, c'est en procédant par va-et-vient dans la construction du modèle, qu'il est possible de savoir si le volume et la qualité des données expérimentales réunies, sont suffisants pour prédire convenablement les comportements du système.

Enfin, un modèle possédant une base empirique solide est le plus sûr garant d'une simulation efficace.

III.- LA SIMULATION

INTRODUCTION

Les méthodes de simulation sont anciennes. Borelli, au 17ème siècle, les utilisait déjà, comme le montrent les dessins de son ouvrage : "DE MOTU ANIMALIUM".

En particulier, il a tenté de démontrer, à l'aide de modèles, que l'action des muscles et la marche se ramenaient à l'application de principes purement mécaniques. Il prit une corde disposée en losange suivant les diagonales AB et CD. En appliquant des forces en C et D, la longueur AB diminue et la surface du losange augmente. Ainsi s'explique la contraction du muscle, qu'il suppose composé d'une quantité de petits rhomboèdres dépourvus d'élasticité. Les forces sont le résultat de réactions chimiques, déclenchées par des fluides nerveux à travers le muscle. Après avoir calculé à l'aide de sa corde, les forces nécessaires à la contraction d'un rhomboèdre, il poursuivit ses expériences sur des ensembles de parallélépipèdes disposés en série et en parallèle, qui représentaient des muscles. Enfin, Borelli associa son modèle de muscle au principe du levier, pour calculer les forces nécessaires au déplacement des animaux et au mouvement du bras de l'homme.

Les écoles de guerre font aussi usage de la simulation depuis fort longtemps. La "boîte à sable en relief" où se déplacent postes de commandement et de télécommunications, régiments, divisions, escadrilles, escadres, groupes d'engins etc...symbolise un théâtre d'opérations et concrétise les idées de manoeuvre des deux adversaires.

Le renouveau de la simulation tient à son champ d'application qui s'est considérablement élargi, à l'ampleur et à la complexité des systèmes qu'il est à présent possible de simuler. Son essor a coïncidé avec la mise en service des ordinateurs qui conditionnent son usage de plus en plus vaste, ainsi que sa puissance. En outre, elle a permis de trouver des solutions à des problèmes que les méthodes classiques n'avaient pu résoudre.

Quand il s'agit de modifier ou de créer un "système d'hommes et de machines", il y a trois façons de procéder. La première consiste à étudier un plan et à le mettre directement en application. Cette méthode est coûteuse, car bon nombre d'ajustements sont nécessaires, même quand l'étude est détaillée. De plus, le plan peut, à l'usage, ne pas tenir les promesses de ses constructeurs, et les répercussions d'une seule erreur dans ces grands ensembles peuvent être catastrophiques.

La deuxième approche est mathématique. Elle est efficace, mais la mise en équations d'un système est souvent difficile et toujours compliquée. Quelquefois elle n'est pas possible, dans les problèmes de concurrence, par exemple ; ou, si elle l'est, la résolution des équations devient inextricable. De toute façon, l'expérimentation est à faire, entraînant avec elle, le risque de l'erreur.

Reste la troisième méthode, à présent largement utilisée : la simulation.

Après l'avoir définie, nous rechercherons ses buts et étudierons ses différents aspects, ses avantages et ses limites.

3.1 DEFINITION

Le mot simulation est un terme à la mode, qui est utilisé dans des sens bien différents. Il en est souvent ainsi des mots du langage courant, adoptés par la suite comme expressions techniques.

Etymologiquement, le mot latin "simulare" veut dire copier, feindre, faire paraître comme réelle une chose qui ne l'est point. Avant de préciser le sens exact que nous donnons ici à ce terme, il peut être profitable de constater comment les différents auteurs définissent la simulation.

- Expérience conduite sur un calculateur à l'aide d'un modèle (1,40).
- Méthode numérique pour résoudre un problème en imitant la réalité (1,6).
- Expérimentation indirecte conduite sur un modèle et non sur le système lui-même (1,48).

- Représentation dynamique de la réalité obtenue en construisant un modèle et en le manipulant pendant un temps donné (2,26).
- Méthode d'utilisation des modèles pour vérifier des solutions (1,36).
- Recherche indirecte des performances d'un système réel (1,13).
- Construction d'un modèle (3,21).
- Technique comportant la construction d'un modèle représentant une situation réelle, et la conduite d'expérimentations sur ce modèle (2,30).
- Expérience avec l'aide d'un ordinateur (2,9).
- Construction et manipulation d'un modèle (2,20).
- Reproduction par un modèle à facteurs stochastiques d'un phénomène stochastique, dont l'analyse par une approche mathématique se révèle impossible ou plus difficile (2,4).
- Outil mathématique qui fournit un terrain d'expérimentation, pour un certain type de systèmes (2,7).
- Tout modèle scientifique d'un système réel (2,16).
- Méthode d'étude du comportement des grands systèmes (1,32).

On voit que le terme "simulation" est assez ambigu : pour les uns, il s'agit d'un modèle, pour d'autres de son application, pour d'autres encore, d'une technique à base d'ordinateurs. En outre, simulation veut dire aussi bien opérations militaires sur un champ de bataille fictif que programme spécial d'ordinateur, ou jeu d'entreprise. Le sens courant du terme est large. Nous l'utiliserons uniquement dans son sens technique et comme pour les systèmes, nous déterminerons ses critères.

L'équipe nucléaire américaine de la dernière guerre a donné un sens scientifique à ce terme. Mais c'est à partir de la mise en service des ordinateurs de la deuxième génération vers 1958, que cette technique s'est considérablement développée.

CRITERES

En premier lieu, la simulation a son origine dans l'étude des systèmes réels ou imaginés, représentés par un modèle. Le modèle est donc un élément fondamental de la simulation. Ce modèle, en lui-même, n'a aucun caractère spécial, mais simplement utilisé à cet effet, il est en général mathématique ou logique, ou les

deux à la fois. Il peut être aussi bien déductif qu'aléatoire.

Sa manipulation a pour but de présenter les diverses solutions d'un problème : elle se fait sur ordinateurs, pendant une période donnée.

Les solutions trouvées sont celles du modèle, qui ne sont pas d'emblée assimilables à celles du système.

Enfin la simulation est une méthode essentiellement pratique, pour le choix des solutions, au moment de la prise de décision.

Il s'agit en fait d'une expérimentation indirecte, sur ordinateur, dans le but pratique de comparer plusieurs façons de procéder. - Figure 3.1 -

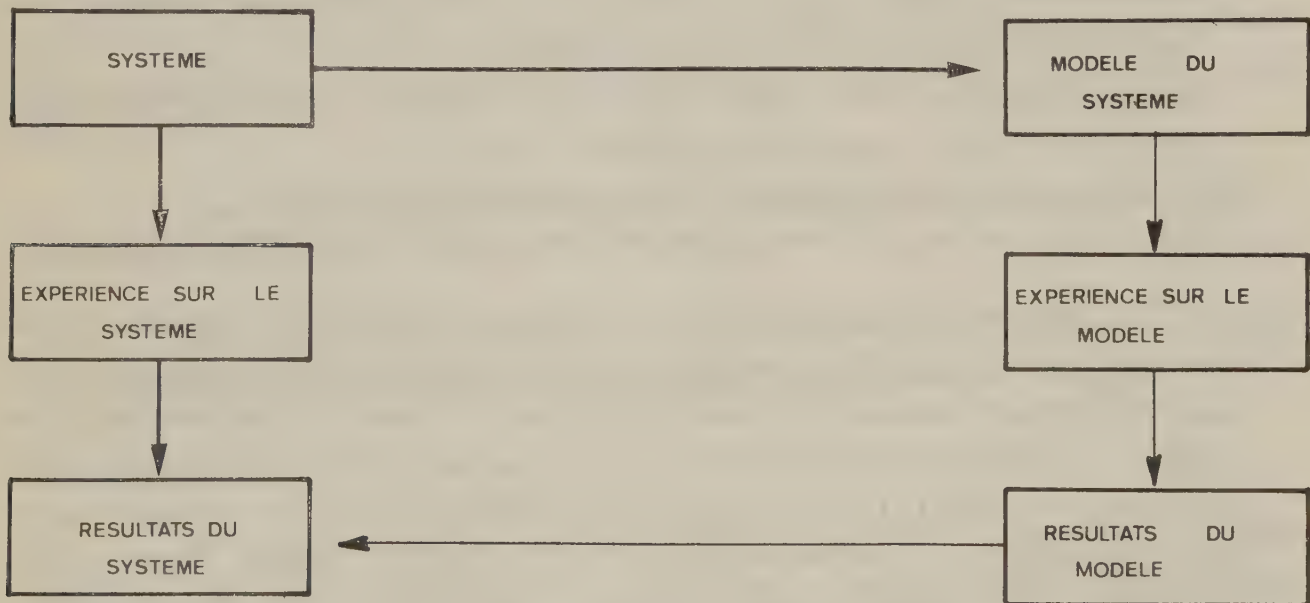


FIGURE 3-1 EXPERIMENTATION DIRECTE ET INDIRECTE

Elle ne résout pas le problème en trouvant la solution ou en définissant les solutions possibles; elle aide seulement à prendre parmi plusieurs décisions, la meilleure possible.

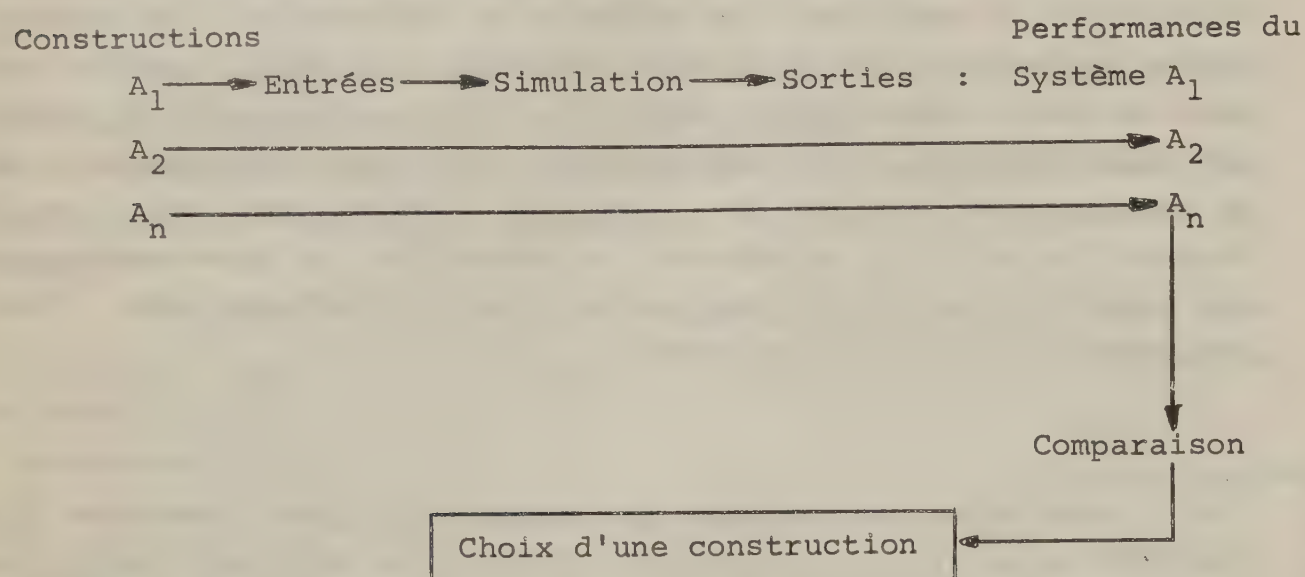
S'il s'agit de décentraliser une usine par exemple, et si plusieurs emplacements semblent convenir, la simulation tiendra compte des voies d'accès, des disponibilités en énergie, en main d'oeuvre et en matériaux, des méthodes de fabrication, des coûts de toutes sortes, et des bénéfices possibles tant dans l'immédiat que dans un avenir rapproché ou lointain ; elle aidera ainsi à prendre une bonne décision, qui, en affaires, se traduit généralement par un accroissement des profits. Décider, dans ce cas, est l'art de trouver la solution présentant la proportion la plus avantageuse des bénéfices par rapport aux coûts. Ces pourcentages sont, éventuellement, les sorties du modèle.

3.2 BUTS

La recherche des buts que poursuit la simulation, ses différents aspects et ses avantages permettront de mieux saisir son essence. La technique de la simulation est utilisée, à présent, dans un triple but : l'analyse des systèmes, leur construction, et comme aide à l'instruction, aussi bien dans l'enseignement que pour l'entraînement.

Dans la première application, la recherche concerne la manière dont les entrées sont transformées pour produire les sorties. Quand le modèle du système est construit, il est alimenté par des entrées comparables à celles du système, de façon à obtenir des sorties qui correspondent aux siennes. Le degré de réussite donne la mesure de la validité du modèle, et autorise une explication du fonctionnement du système réel. Ainsi, grâce à la simulation il devient possible, lorsque le modèle est au point, de faire des expérimentations, de changer des politiques, de proposer des modifications de conditions et de méthodes de travail, de peser les risques et d'évaluer les bénéfices de ces changements, en un mot de prédire l'ensemble des conséquences de transformations possibles ou d'idées nouvelles. Cette application conduit donc à la découverte, à la clarification, et à la confrontation de solutions possibles, soumises à la décision du chef, sur sa demande, ou à l'initiative de ses collaborateurs.

La simulation dans la construction des systèmes est semblable à une expérience de laboratoire, et aboutit à la comparaison de plusieurs modes de construction de systèmes.



- Figure 3.2 - Simulation de diverses constructions d'un système.

L'analyste a la faculté d'assembler de façons différentes, les sous-ensembles d'un système qu'il construit, pour chercher et obtenir un meilleur profit, des coûts et des temps réduits etc.... Cette méthode est identique à celle qui est utilisée, dans les souffleries ou bassins de carènes, avec les maquettes.

Ces deux applications, relatives à l'analyse et la construction des systèmes, paraissent fondamentalement identiques. Dans les deux cas, en effet, il s'agit d'expériences; c'est là l'essence de la simulation : prédire et comparer avant de décider. Toutefois, la connaissance du système est plus approfondie quand il s'agit de construire et non pas seulement d'analyser. D'un autre côté, ces deux aspects s'interpénètrent quand on étudie des plans opérationnels complexes, dans le but de les corriger ou de les redessiner. En somme, savants, ingénieurs, hommes d'affaires en appliquant cette nouvelle technique à grande échelle, cherchent à mettre à l'épreuve, à l'avance, leurs idées ou les changements qu'ils proposent.

SIMULATEURS

La troisième application est pédagogique et concerne à la fois, l'entraînement et l'enseignement. L'aviation commerciale et militaire font un usage intensif des simulateurs de vol, non seulement pour la formation première du personnel navigant, mais aussi pour la transformation des équipages sur matériel nouveau et pour les contrôles périodiques.

Les "link-trainers" avaient été conçus, autrefois, pour initier et entraîner les pilotes au vol élémentaire aux instruments, et pour familiariser les navigants avec les procédures de radio-navigation, d'approche sans visibilité et de radio-téléphonie. Ces appareils ont cependant un grave défaut ; ils simulent mal le vol et ne rappellent pas aux pilotes leur cabine familière.

Par contre, en s'asseyant aux commandes d'un simulateur de vol, on est surpris immédiatement par la disposition et l'encombrement de la cabine du pilote et des autres membres de l'équipage. Tout est identique à l'avion ; on y retrouve les mêmes manettes, les mêmes cadrans, les mêmes contacts ; la verrière se verrouille de la même façon, le poussoir du siège éjectable est là aussi. Rien ne manque. Sur les simulateurs d'avions de chasse, la partie avant est constituée par la carlingue de l'avion : la similitude est donc parfaite. En général, les simulateurs de vol sont spécialisés comme les avions ; comme eux aussi, ils se nomment simulateur Mirage, Caravelle etc... On avait senti, autrefois en France, la nécessité d'une liaison étroite entre la planche de bord standard et le pilote, de même aujourd'hui, devant la complexité des habitacles et la vitesse des avions qui imposent des réflexes rapides sur les manettes ou les contacts, on se rend compte qu'au sol comme en vol le pilote et sa carlingue doivent être solidaires.

On pourrait croire qu'un appareil fixe, dont les instruments seuls sont mobiles, traduit mal la réalité. Pour se convaincre du contraire, il suffit de se mettre aux commandes d'un simulateur et d'exécuter quelques figures acrobatiques ou de voir le visage épanoui d'un pilote de "Mirage", à la suite d'un exercice d'interception réussi ; en fait, seules comptent les indications des instruments.

La grande innovation provient du calculateur électronique dont le rôle est d'intégrer, d'une façon continue, les équations du vol, à partir des caractéristiques connues de l'avion et de ses réacteurs. L'affichage des données : vent, poids total de l'avion, centrage de l'appareil, et l'introduction par les manoeuvres habituelles de pilotage, d'éléments variables tels que la position de l'avion, le régime du réacteur, la sortie des freins de piqué ou des volets, ont finalement pour effet de faire apparaître sur le tableau de bord du pilote, les mêmes indications que celles qu'il lirait au cours d'un vol réel. Seuls, les effets des accélérations ne sont pas reproduits ; par contre, toutes pannes, ou défauts intéressant la cellule et les moteurs, peuvent être introduites à volonté.

Certains se sont demandés s'il n'eut pas été indispensable de simuler les effets physiques de l'accélération et de la décélération. Techniquement, il est possible de le faire, mais au prix d'un matériel volumineux, compliqué et coûteux. Aussi, jusqu'à présent, les experts n'ont-ils pas jugé utile de simuler "G", ni, pour les mêmes raisons, la pressurisation de la cabine.

La complexité du calculateur est comparable à celle du simulateur d'effort sur les gouvernes. Il en reproduit fidèlement les réactions sur les commandes. Les effets de la compressibilité, par exemple, affectent le manche et le palonnier, au même nombre de Mach qu'en vol réel et de la même façon.

Le pupitre instructeur constitue le perfectionnement pédagogique le plus remarquable et le plus efficace pour la sécurité des vols. Il comporte un panneau répétiteur des principaux instruments du tableau de bord, et permet ainsi de suivre le déroulement du vol. Une rangée de lampes de différentes couleurs avertissent immédiatement le moniteur de toute erreur du pilote, comme par exemple, le dépassement du nombre de Mach critique, ainsi que les conséquences de toute fausse manoeuvre. La partie essentielle du pupitre est constituée par le tableau de pannes. Plus de cinquante contacts sont à la disposition de l'instructeur pour contrôler les connaissances, les réflexes, l'habileté, le jugement du pilote et

aussi le comportement des membres de l'équipage, en face de pannes ou de manoeuvres de secours. Il ne s'agit pas seulement d'arrêt de moteur, de givrage, de feu à bord, de survitesse, de forte turbulence, mais aussi de la foudre, d'un pneu qui éclate au décollage, d'un parachute-frein qui ne s'ouvre pas, d'une température de tuyère anormale, d'une fuite dans une canalisation hydraulique, d'une panne d'oxygène etc...

Sur un simulateur d'avion de bombardement, il est possible d'introduire une centaine de pannes ou de conditions de vol anormales.

L'équipement radio-radar de l'ILS au VOR-DME, ou du TACAN au DECCA, fonctionne comme celui de l'avion. L'instructeur choisit les balises, les dispose sur la carte aux points voulus, leur donne une fréquence, des lettres d'identification, une portée et les oriente éventuellement ; ensuite leur fonctionnement devient complètement automatique.

La route suivie par l'avion ainsi que toutes les manoeuvres d'attente et de percée sont enregistrées sur la table de navigation.

Au cours d'un voyage de 2.000 kilomètres, le vent peut changer en direction de 360° et en force de 0 à 120 noeuds, la pression peut varier de 710 à 785 millimètres de mercure et les terrains d'atterrissage s'élèvent de 0 à 1.500 mètres.

On conçoit que la puissance électrique nécessaire à alimenter un tel ensemble soit considérable.

Tels sont les principaux éléments de base des simulateurs de vol. Cette description fait apparaître les vastes possibilités de ces appareils qui permettent, en outre, d'améliorer l'entraînement, de diminuer le nombre des accidents, et puis de réaliser de grosses économies, car les coûts de l'heure-avion et de l'heure-simulateur sont dans la proportion moyenne de 10 à 1.

Mais il est essentiel de se rappeler qu'en dépit des qualités extraordinaires et des possibilités étendues de ces appareils, la perfection au sol ne garantit pas toujours celle en vol;

l'expérience a prouvé en effet que certains sujets, excellents au sol, réussissaient beaucoup moins bien en l'air pour de multiples raisons : peur, timidité, nervosité, manque d'aisance etc... Autrement dit les simulateurs ne remplaceront jamais complètement l'avion. En définitive, c'est en vol, que le jugement le plus exact peut être porté. Il convient donc de trouver un équilibre harmonieux du couple "Simulateur-Avion", dans l'établissement des programmes d'instruction.

Quoi qu'il en soit, les pilotes de l'espace font d'ores et déjà un usage intensif des simulateurs qui leur permettent d'apprendre par coeur, dans les moindres détails, le déroulement de leur mission et de réagir, par réflexes, aux conditions normales et anormales du vol.

LES JEUX

Les jeux d'école de guerre ou d'entreprise se sont considérablement développés depuis que les ordinateurs ont été utilisés à cette fin. Ceux-ci, en effet, ont remplacé les abaques et permis la représentation de situations complexes proches de la réalité. Les jeux entrent dans deux catégories : jeux de combat ou de concurrence et jeux du mécanisme de la décision.

Dans les premiers, deux équipes en général sont face à face. Les décisions de l'une tiennent compte des règles du modèle, mais aussi des décisions de l'autre équipe. Autrement dit, aucune stratégie, aucune politique n'est imposée.

Dans les seconds, une seule équipe joue. La stratégie est imposée. Seules interviennent les réactions du modèle et les décisions prises, qu'il est possible, par la suite, de comparer à une solution type. Il s'agit donc avant tout pour l'équipe de décider intelligemment et logiquement. De tels jeux ont cet autre avantage de préparer à une direction collégiale des affaires ou de la guerre, car le commandement individuel au sommet n'est plus possible, de nos jours, compte tenu de la complexité du monde, des situations et des moyens d'action.

Les ordinateurs servent à deux grandes fins : d'une part ils effectuent les calculs demandés par les joueurs, d'autre part ils tirent les conséquences des décisions prises.

Il va de soi que la simulation est utilisée pour la recherche. Un modèle éducatif complexe, par exemple, est aussi un modèle expérimental. Pour trouver l'explication des processus économiques la simulation est précieuse. La vérification des hypothèses qui est le propre de la simulation, n'est-elle pas aussi de la recherche ?

3.3 CLASSIFICATION

Les variétés de modèles peuvent servir de base à la classification des divers types de simulation, celle-ci étant à l'image de son modèle. Une simulation physique ou abstraite, industrielle, économique ou logistique, fait intervenir un modèle du même nom.

La mise en service des ordinateurs a apporté une nouvelle classification qui ne reflète pas une différence de conception, mais seulement de mécanisme. On distingue en effet la simulation manuelle, graphique et écrite, de celle qui recourt aux ordinateurs.

La simulation manuelle d'un petit système est certainement plus économique. Pour simuler le trafic ferroviaire futur sur une ligne secondaire par exemple, un graphique suffit. Villes et distances figurent sur l'axe des x, et les heures de la journée, sur l'axe des y. Des obliques sinueuses correspondantes aux numéros des trains, symbolisent le passage et les heures des trains de voyageurs prioritaires, des trains de marchandises non prioritaires, ainsi que les arrêts de ces derniers dans les stations de garage, afin d'assurer l'écoulement prioritaire des trains de voyageurs plus rapides. Ce graphique donne la possibilité de vérifier si la sécurité, c'est-à-dire l'écart en minutes qui doit séparer les trains, est respectée et si des trains supplémentaires peuvent, éventuellement, être intercalés dans ce trafic. Il permet aussi de déterminer le nombre total de trains de marchandises, compatibles avec un nombre donné de trains de voyageurs.

La méthode manuelle demanderait beaucoup de temps, pour mettre au point le graphique d'une ligne à très grand débit. De plus, elle risquerait d'être partiellement inefficace, sur le plan essentiel de la sécurité. C'est pourquoi la simulation pour les

grands axes ferroviaires s'effectue toujours sur ordinateurs numériques ou analogiques.

Un ordinateur numérique est essentiellement un appareil qui enregistre et emmagasine des nombres et des mots, sous forme de chiffres, qu'il manipule ensuite conformément aux règles d'un programme. Pour qu'un ordinateur simule un système, il convient donc de construire un modèle du système, de le rendre assimilable par l'ordinateur, de fixer les règles de son exécution et de sa manipulation. La définition du modèle est du ressort du savant ou de l'ingénieur, tandis que l'analyste programmeur prend à sa charge l'élaboration du programme de simulation. Celui-ci comporte la traduction du modèle dans le langage de l'ordinateur, la procédure détaillée que devra suivre l'appareil pour exécuter le modèle, enfin en liaison avec l'ingénieur : la définition des valeurs initiales des variables, et les changements de valeur des paramètres, à chaque passage du modèle sur l'ordinateur.

Un programme de simulation est semblable à tout autre programme d'ordinateur : il est en effet demandé à l'appareil d'accueillir des entrées, d'exécuter des opérations numériques, de faire des comparaisons, de présenter des sorties, suivant un plan. Nous verrons toutefois, que des langages de simulation spéciaux ont été mis au point, pour réduire l'effort et la durée de la programmation utilisant les langages habituels.

Il est d'usage de qualifier la simulation sur ordinateurs numériques de trois façons : déductive, aléatoire, et opérationnelle.

La simulation déductive repose sur un modèle du même nom, dans lequel aucun facteur aléatoire n'intervient, parce que le système n'en contient pas, ou parce qu'ils sont négligés. La simulation historique entre dans cette catégorie. Quand une situation passée est connue comme l'activité d'un aéroport, ses données sont introduites dans l'ordinateur sous forme de modèle et les effets consécutifs à un changement dans le fonctionnement, sont étudiés par comparaison avec les résultats passés : cette méthode apporte d'utiles enseignements pour diminuer les temps d'attente, améliorer les taux d'utilisation etc...

Dans la simulation aléatoire, le hasard intervient car il existe réellement dans le système. L'ordinateur introduit des variables aléatoires à volonté, selon une méthode que nous étudierons ultérieurement. Cette méthode comporte trois stades : établir la loi de probabilité, tirer un nombre aléatoire et déterminer la valeur correspondante de la variable en fonction de ce nombre. Ce type de simulation donne des résultats plus proches de la réalité, mais son temps de passage sur ordinateur est plus long.

L'homme intervient pour prendre des décisions au cours du déroulement d'une simulation opérationnelle, qu'il s'agisse de jeux d'opérations militaires, de jeux d'entreprise ou de jeux politiques. Les premiers comprennent les jeux tactiques liés au combat du même type, comme la simulation d'une Brigade Mécanisée ou celle des évacuations sanitaires à l'échelon d'une Division, et les jeux stratégiques comme la simulation d'un bombardement intercontinental, qui met en action les forces militaires, politiques, morales et économiques d'un pays.

Les jeux d'entreprise se divisent, eux aussi, en jeux tactiques à tendance cyclique, comme la simulation d'un trafic ferroviaire, et en jeux dynamiques, lesquels tiennent compte des états antérieurs et de leurs conséquences, telle la simulation d'un marché.

Enfin, les jeux politiques simulent habituellement des situations internationales. Ils poursuivent les mêmes buts que les jeux militaires et économiques : but pédagogique, pratique du commandement, recherche pour découvrir la politique des voisins et améliorer la sienne propre.

Ces types de simulation déductive, aléatoire et opérationnelle ne s'excluent pas. Un modèle aléatoire peut comporter un sous-ensemble déductif; de même, un jeu d'entreprise peut comprendre des sous-systèmes déductifs et aléatoires.

Il existe un autre critère de classification : la vitesse de simulation. La trajectoire d'un engin ou le décollage d'une capsule spatiale, sont simulés à temps réel ou au ralenti, tandis que les simulations industrielles, économiques et militaires sont effectuées le plus souvent à temps accéléré. Cette contraction du

temps, qui représente simulées en quelques minutes, des dizaines d'années d'activité, est un avantage majeur des techniques de simulation.

3.4 AVANTAGES

Il existe d'autres avantages qui tiennent à la méthode elle-même, au travail minutieux de préparation qu'elle impose, et aux résultats qu'elle obtient.

Certains problèmes, nous l'avons vu, ne peuvent pas être traités d'une autre façon, parce que la mise en équations n'est pas possible ou trop compliquée, ou parce que le système est trop complexe. En outre, l'observation du système et l'expérimentation directe se révèlent souvent difficiles et très coûteuses, comme dans les systèmes spatiaux, nucléaires ou industriels. Enfin, les utilisateurs qui n'ont pas de connaissances mathématiques poussées peuvent, avec un peu de bonne volonté, suivre ce qui se passe et de ce fait, analyser leur problème avec plus de rigueur et conserver le contact avec les chercheurs.

La construction d'un modèle exige une analyse détaillée du système pour découvrir les sous-ensembles, pour dégager variables et relations, pour rassembler données et paramètres exacts. Il faut, en effet, une connaissance approfondie d'un système, avant de tenter sa simulation avec quelques chances de succès. Ensuite, le dessin de l'organigramme met en relief les centres de décision et le fonctionnement de l'ensemble. Ainsi, les anciens problèmes sont mieux compris et d'autres insoupçonnés surgissent.

Mais les avantages les plus marquants s'inscrivent dans les résultats, car la simulation est une excellente méthode de comparaison, d'amélioration, et d'appréciation des risques. Elle permet de mettre en parallèle plusieurs stratégies ou plusieurs politiques, pour choisir la meilleure, et on peut répéter les expériences à volonté. C'est aussi un banc d'essais pour apprécier de nouvelles idées, pour prévoir les conséquences de changements imposés, voulus, souhaités ou simplement essayés. La simulation évite donc les risques d'erreurs, donne à l'avance une connaissance des profits ou des pertes, remplace une expérimentation hasardée et coûteuse. Cette technique offre, en outre, la possibilité de vérifier

les solutions obtenues par d'autres méthodes, et de mettre à l'épreuve des modèles construits par les théoriciens. Son mécanisme montrera qu'en évaluant la dispersion des résultats, on peut connaître les risques, et il rendra possible l'analyse des états transitoires, ainsi que la mesure de la vitesse de convergence vers la stabilité du système.

La simulation a déjà fait largement ses preuves dans les domaines de la pédagogie, de l'entraînement et de la recherche.

3.5 LIMITES

Si la technique de simulation présente de gros avantages, elle a cependant ses limites inhérentes à la méthode, à la construction du modèle et aux résultats.

La simulation, par définition, n'est pas une expérimentation sur le système mais sur le modèle. Il est tentant d'assimiler ses résultats à ceux de la réalité.

C'est une méthode parmi d'autres, et il convient de s'assurer que c'est bien elle qui convient le mieux au cas considéré.

Sans comparer son prix à celui d'une expérimentation directe, le procédé est néanmoins coûteux, car il nécessite des spécialistes et des moyens importants : les ordinateurs.

La simulation donne une solution, dans des conditions définies, et non la solution optimale. Ce n'est pas une méthode auto-adaptative, ni rapide. La solution choisie est le fruit d'un travail de comparaison.

En outre, cette technique fait intervenir le calcul de probabilités et la méthode de Monte-Carlo ; elle oblige à des simplifications et à des extrapolations ; elle ne prend pas en compte tous les facteurs : elle n'est donc pas précise par nature.

Par ailleurs, chaque simulation est adaptée à un système : les généralisations sont délicates et, le plus souvent, une nouvelle étude exige la construction d'un nouveau modèle.

La mise au point d'un modèle est toujours longue. Elle est suivie par la programmation qui demande beaucoup de temps, par elle-même et pour valider le programme. La simulation reproduit, en outre, tous les défauts d'un modèle mal établi, par méconnaissance de variables importantes, ou par excès de détails.

Il n'est donc pas étonnant que les résultats de la simulation ne concordent pas exactement avec les faits. Même en manipulant un modèle bien construit, le hasard peut amener des divergences entre les résultats simulés et observés.

Comme les ordinateurs impriment, facilement et à la demande, des colonnes interminables de chiffres, l'analyse des résultats peut exiger beaucoup de temps et d'argent, et faire porter l'attention sur les chiffres plutôt que sur les caractéristiques du système à l'étude. Les solutions générales, en effet, s'élaborent par induction à partir de cas numériques, et c'est là une difficulté majeure.

Enfin, les meilleurs résultats sont obtenus par interpolation des valeurs les plus favorables des variables, choisies parmi de nombreuses simulations obtenues l'une après l'autre, en faisant varier à chaque fois la valeur d'un ou de plusieurs paramètres.

3.6 CONCLUSION

L'énoncé des principaux avantages et limites de la simulation fait déjà apparaître que cette technique n'est pas simple, qu'elle peut être riche en enseignements, mais aussi pleine d'écueils, et qu'en tout état de cause, ses résultats sont à interpréter avant d'être appliqués au monde réel. Mais les ordinateurs apportent à cette méthode d'énormes possibilités, dont l'exploitation progressive mérite de patientes recherches.

La simulation est une méthode expérimentale applicable à la résolution de problèmes, en particulier dans l'analyse et la construction de systèmes. Elle conduit souvent à des résultats valables, là où les autres méthodes analytiques ont échoué.

Enfin, grâce à la simulation qui procède par approximations, corrections et approches successives, on arrive, en perfectionnant le modèle, à mieux comprendre et même à formuler les lois du système réel.

IV. - LA SIMULATION DES SYSTEMES

INTRODUCTION

L'étude des systèmes, des modèles et de la simulation en général, est une préparation indispensable à la compréhension de la méthode de simulation des systèmes. Celle-ci est à considérer comme un guide. L'expérience nous a montré qu'elle était fort utile. Les différentes phases qu'elle propose ne sont pas aussi distinctes qu'on pourrait le croire:elles se chevauchent et s'interpénètrent.

Par contre, les trois grandes parties qui la composent, construction du modèle, programmation sur ordinateur et analyse des résultats - Figure 4.1 - ne se recoupent pas dans un premier temps, en ce sens que le modèle doit être construit avant de commencer la programmation, et que celle-ci doit être terminée avant d'obtenir des résultats. L'intégration de ces trois phases se fait pour ainsi dire après coup, lorsque les premiers résultats commencent à sortir, au cours des mises au point et des inévitables réajustements et perfectionnements opérationnels.

Après avoir exposé la méthode générale de simulation des systèmes, nous analyserons ensuite les moyens et techniques, auxquels elle fait appel : ceux-ci comprennent les mathématiques et les techniques de la simulation, les langages de simulation et les tests de validité. Enfin, nous essaierons de fixer le champ d'application de la simulation des systèmes et les tendances de cette discipline.

4.1 LA METHODE DE SIMULATION DES SYSTEMES EN GENERAL ET DES SYSTEMES DE GESTION EN PARTICULIER

TECHNIQUE DE RECHERCHE OPERATIONNELLE

Comme la simulation est une technique particulière de la Recherche Opérationnelle, sa méthode sera très proche de la méthode générale que l'on peut formuler ainsi :

- Enoncer le problème dans l'optique du système,
- Construire un modèle du système pour dégager une solution,
- Vérifier modèle et solution,
- Mettre en pratique la solution retenue.

Dans la première phase d'un travail de Recherche Opérationnelle, le système considéré est analysé sous son aspect global. Ses buts, ses limites, ses composants, leurs relations, le milieu, une mesure de son rendement, sont définis et entrent dans l'énoncé du problème.

Puis un modèle mathématique est construit, dans le but de mesurer le rendement du système. A cet effet, sont déterminées les variables, contrôlables et incontrôlables, leurs limites et leurs relations. Une solution est déduite soit analytiquement, c'est-à-dire sous forme de symboles qui sont remplacés ultérieurement par des nombres, soit numériquement en donnant aux variables contrôlables des valeurs successives qui permettent de comparer les résultats obtenus pour retenir les meilleurs.

Le modèle est ensuite vérifié, en comparant ses résultats à ceux du système, grâce à des éléments passés. Même réussi, un modèle ne conserve sa valeur que si les variables et les relations sont relativement stables. Des modifications se produisent-elles, on devra les détecter et des règles seront établies pour adapter les solutions à ces changements.

Enfin, le projet retenu est exécuté et il appartient encore au domaine de la Recherche Opérationnelle de définir méthodes et moyens, de façon à parvenir à un fonctionnement souple du système.

Ces phases, qui en réalité se recoupent, montrent les principales étapes intellectuelles d'un travail de Recherche Opérationnelle. Il n'est donc pas étonnant de les retrouver dans la méthode de simulation des systèmes, et des systèmes de gestion en particulier, qui fourniront les exemples de cette étude théorique.

Ces méthodes ne sont, en fait, que des variantes de la méthode scientifique classique qui comporte : l'observation des faits, la construction d'un modèle pour expliquer ces faits, la recherche de solutions par déduction mathématique ou logique du modèle, et enfin la vérification des résultats du modèle, par comparaison avec ceux obtenus par des expérimentations directes.

Les ordinateurs donnent à la méthode de simulation ses caractéristiques et expliquent ses différences avec la méthode de Recherche Opérationnelle et la méthode scientifique classique. En effet, ils suppriment, en partie, la difficulté de rassembler des données expérimentales, en produisant des observations indirectes tirées des distributions de probabilité. Ils permettent de faire des expérimentations indirectes, pour remplacer les expériences impossibles à réaliser ou trop coûteuses. Ils s'accommodent d'un nombre considérable de variables, de modèles extrêmement complexes, pour autant qu'ils se rapprochent davantage des systèmes réels. Enfin, ils manipulent les modèles à une vitesse sans commune mesure avec celle des autres méthodes. La simulation fait appel, elle aussi, aux sciences classiques, mathématiques et statistiques, comme à toutes les sciences particulières dans lesquelles on l'utilise.

LA METHODE DE SIMULATION

A - LE MODELE

La marche à suivre pour simuler un système comprend trois parties relatives au modèle, à sa programmation et à l'analyse des résultats. Le modèle à lui seul comporte, l'énoncé du problème, le recueil des données, la construction du modèle, l'estimation des paramètres des relations fonctionnelles, et finalement la vérification du modèle et des paramètres - Figure 4.1 - page 76.

LE PROBLEME

L'énoncé d'un problème pose un certain nombre de questions, qui définissent les buts de la recherche - Quel effet, par exemple, aurait sur l'économie du pays, une réduction de 15% du premier tiers provisionnel des impôts ? - Est-il possible de doubler le nombre des trains de voyageurs sur la ligne Paris-Grenoble, pendant la durée des Jeux Olympiques, et quelles seraient, dans ce cas, les répercussions sur le trafic ferroviaire normal ? - Quelles seraient les conséquences sur les départs et les arrivées des avions à l'aérodrome d'Orly, si par temps orageux et vent fort, les avions en pile d'attente étaient espacés de 600 m, au lieu de 300, et si une seule piste était en service ? - etc... Quand le modèle existe, la réponse s'obtient en formulant une nouvelle hypothèse, par changement de variables ou de paramètres.

Il ne suffit pas de poser le problème, il faut encore s'assurer que la technique de simulation convient le mieux à sa solution, que son coût ne sera pas prohibitif et que les résultats obtenus de cette façon, seront compris et suffisamment convaincants pour ceux qui ont à les utiliser et à décider. L'énoncé d'un problème n'est pas toujours aussi simple et précis. Le plus souvent, il subit des modifications en cours d'étude, jusqu'à sa version finale.

LES DONNEES

Le recueil des données n'est pas spécial à la simulation: il est commun à toutes les méthodes. L'expérience prouve que cette phase est longue et difficile. Comme pour la documentation, il convient, tout d'abord, de connaître les meilleures sources pour se procurer les éléments du problème et, par ailleurs, il est rare de les trouver sous la forme souhaitée. Ensuite, il convient de les ajuster, car elles sont d'origines différentes et n'ont pas été établies suivant les mêmes normes. Ainsi en va-t-il des statistiques, des documents écrits ou des résultats d'expériences. En fait, le recueil des données ne constitue qu'une partie du problème général de l'information ; les renseignements une fois obtenus doivent être comparés, jugés puis enregistrés sous une forme assimilable, qui nécessite souvent leur conversion et leur transmission, pour pouvoir être finalement manipulés.

CONSTRUCTION

La construction d'un modèle débute, nous l'avons vu, par la définition des composants, des variables, des paramètres et par la recherche des relations fonctionnelles entre composants et variables. Nous savons aussi que la principale qualité d'un modèle est de fournir des solutions applicables au système. Pour ce faire, deux conditions sont à réunir: d'une part, la pratique des méthodes de Recherche Opérationnelle et de la simulation en particulier, d'autre part, la connaissance approfondie du système.

Un certain nombre de facteurs doivent être pris en considération, au cours de la construction d'un modèle ; la définition et le nombre des variables constituent en réalité le principal, puisqu'il est à l'origine des autres.

Les variables de sortie sont généralement faciles à définir, car elles constituent les objectifs de la recherche. Leur nombre est limité par les possibilités de l'ordinateur et par la simplicité du modèle. Par contre, le choix des variables d'entrée n'est pas aisé. Il conditionne la validité et la complexité du modèle, et par contrecoup, la durée du travail de programmation ainsi

que le temps de fonctionnement de l'ordinateur. Celui-ci est souvent considérable, car pour l'étude des cas limites, il est nécessaire de simuler des années de fonctionnement, en particulier quand des éléments aléatoires entrent en jeu, ou que l'on cherche à atteindre une précision statistique fixée, ou encore lorsque le modèle détermine lui-même certains paramètres statistiques. Nous verrons qu'il existe des techniques de réduction de variance, capables de limiter en fait, le temps de fonctionnement de l'ordinateur, en augmentant la précision d'une simulation avec le même nombre d'expériences. Comme pour les variables de sortie, le nombre des variables d'entrée dépend de la puissance de l'ordinateur. Il est, en outre, directement lié à la complexité du modèle.

La durée du travail de programmation est fonction de la complexité du modèle, elle aussi, et de la présence de variables aléatoires. Le programmeur cherche de son côté à diminuer les temps de passage sur ordinateur, en choisissant, en particulier, un langage de simulation adapté au modèle. Aux soucis de rester dans les possibilités de l'ordinateur et de réduire les temps, s'ajoutent pour l'ingénieur ou le savant les difficiles problèmes de variables sans unités de mesure, et de relations qui ne s'expriment pas dans le langage mathématique.

Le modèle de simulation, une fois construit, doit posséder les caractéristiques suivantes :

- Décrire les interactions entre les composants,
- Fixer les règles de fonctionnement du système,
- Se présenter sous la forme d'un organigramme.

Les organigrammes des modèles économiques ou de gestion figurent sous une double forme: ils représentent le système d'ensemble et globalement, ou bien ils apparaissent sous une forme modulaire, avec plusieurs sous-programmes s'enchaînant les uns les autres. La première formule a été tentée, nous le verrons, mais avec un succès limité dû à l'extrême complexité des systèmes économiques. La seconde est la plus communément utilisée: elle va du simple au composé, par apports successifs.

PARAMETRES

Une fois érigé le modèle théorique du système, il faut l'alimenter. A cette fin, on fixe les valeurs des paramètres entrant dans les relations fonctionnelles, en se basant sur des observations du système réel. Ces données ne doivent être ni marginales, ni exceptionnelles, mais jugées statistiquement. Les tests à cet effet seront exposés dans les techniques de simulation.

VERIFICATION

Le schéma de la méthode de simulation fait apparaître des vérifications de validité à deux stades : dans l'étape finale du modèle où nous sommes arrivés et dans la programmation. Il s'agit maintenant d'apprécier la validité du modèle. La vérification portera principalement sur les hypothèses et les entrées. Dans la "vérification programmation", l'accent sera mis sur les sorties. Cette première vérification commence par un examen critique du modèle : les hypothèses sont reprises l'une après l'autre, les variables et les relations passées au crible, les paramètres réévalués et testés. Ensuite, le modèle est mis à l'épreuve, le plus souvent manuellement, de façon à comparer ses résultats aux données "historiques" du système. Si la concordance est raisonnable, la programmation peut commencer, sinon le modèle est à modifier. La concordance avec les faits passés donne, en effet, une certaine garantie aux possibilités de prédiction du système.

B - LA PROGRAMMATION

La programmation débute toujours par la mise sur pied de l'organigramme, qui décrit le déroulement logique du modèle. Cette étape initiale est la plus importante. Le codage, en effet, n'est qu'une transposition de l'organigramme, dans le langage de l'ordinateur. Un programme de simulation peut être écrit dans un des langages habituels : Fortran, Cobol, Algol ou PL 1. Nous verrons qu'il existe des langages spéciaux de simulation, dont l'intérêt est de simplifier le travail du programmeur et de réduire les risques d'erreurs, au prix d'une certaine rigidité et d'un accroissement du temps de passage sur ordinateur.

Dès que le codage est terminé, le programme est une première fois vérifié. Ce premier test est pour ainsi dire formel. Il s'agit de corriger les fautes de codage et de logique, détectées la plupart du temps par l'ordinateur lui-même, et de s'assurer que les sorties sont plausibles. Puis commencera une phase critique de la programmation avec la définition des conditions initiales du modèle qui repose sur une hypothèse de départ. Celle-ci est délicate à faire, car elle peut être à l'origine de résultats erronés. C'est par tâtonnements qu'on atteint le plus facilement un bon équilibre de départ. Les données sont introduites dans l'ordinateur, par l'intermédiaire de cartes perforées ou de bandes magnétiques.

Nous étudierons, en outre, la façon dont nombres et variables aléatoires peuvent être produits par l'appareil lui-même, à l'aide de sous-programmes spéciaux.

Le programmeur rédige, enfin, les instructions qui définissent la forme dans laquelle sont demandés les résultats: sur ce point, les langages de simulation imposent des formats de sortie, et sont donc plus restrictifs que les langages habituels, qui offrent une gamme étendue de possibilités.

VERIFICATION

La vérification du modèle est la deuxième étape de la programmation : elle est à la fois du ressort du programmeur et de l'ingénieur. Elle a été précédée par un premier test de l'ingénieur avant le début de la programmation, puis par une deuxième vérification du programmeur quand le codage est terminé.

"Minute de vérité" pour l'un et pour l'autre, l'in vraisemblance ou l'erreur pouvant venir du modèle, de l'organigramme ou du codage. Ce contrôle n'est d'ailleurs pas spécial à la simulation. Il n'est qu'un cas particulier du problème général de la vérification des hypothèses. Si des données historiques ou des statistiques existent, elles serviront de comparaison avec les sorties du modèle. Dans certains cas, des observations permettront d'apprécier la valeur des prédictions.

Les autres tests de validité seront développés dans les techniques de la simulation.

C - LES RESULTATS

Lorsque le programme de l'ordinateur représentant le modèle est estimé valable, la manipulation commence. Elle se fait suivant un plan qui fixe l'ordre et le degré de variation des paramètres, ainsi que la période de simulation. Les passages sur ordinateur sont numérotés. Les résultats sont présentés sous l'aspect de tableaux et de graphiques, comportant, tous les deux, le facteur durée : années, mois, jours ou minutes de simulation. Les résultats partiels sont synthétisés au terme de la durée de la simulation sous forme de sommes, moyennes, écarts types etc...

L'analyse des résultats a de nombreux points communs avec celle des données expérimentales. Il convient, à ce moment, de revenir aux objectifs de la simulation pour orienter l'analyse. Des méthodes statistiques ont été mises au point pour l'étude des résultats simulés. S'il s'agit, par exemple, de montrer la similitude de deux situations, l'analyse des écarts types convient. Pour montrer le degré de leurs différences, la méthode des comparaisons multiples est indiquée. Celle du classement multiple constitue une bonne approche, pour classer des politiques par ordre d'efficacité décroissant. Enfin, les résultats d'une simulation, économique en particulier, ne sont généralement pas indépendants mais souvent en relation réciproque. L'analyse spectrale sert à l'étude de cette corrélation.

La méthode de simulation, tout au long de son développement, oblige à de nombreux retours en arrière, pour les ajustements, changements ou réorientations nécessaires. Par ailleurs, elle fait appel à des techniques variées, les unes classiques, les autres particulières qu'il est indispensable de connaître.

4.2 LES MATHÉMATIQUES DE LA SIMULATION

Ceux qui utilisent les méthodes de simulation, ne sont pas d'accord sur le bagage mathématique nécessaire à l'application de cette technique. Les uns affirment que le niveau mathématique requis ne dépasse pas les connaissances acquises au lycée. Ils ont raison quand la simulation met seulement en oeuvre un modèle de procédure.

Les autres estiment que seuls les spécialistes ès mathématiques ont les qualités et connaissances nécessaires pour conduire à son terme, une simulation tant soit peu complexe. Il faut bien reconnaître, avec ces derniers, que la plupart du temps, la construction des modèles, leur adaptation à l'ordinateur, l'application des tests de validité, la connaissance des sciences particulières qui font usage de la simulation, exigent des connaissances mathématiques de l'enseignement supérieur. L'algèbre matricielle, la théorie des chaînes évolutives, l'algèbre logique, la topologie, le calcul statistique, le calcul différentiel et intégral, le calcul linéaire, sont les branches des mathématiques les plus souvent employées dans cette discipline.

Chacune de ces branches est une spécialité qui compte un certain nombre d'experts. Il n'est pas nécessaire d'être l'un d'eux, pour réussir une simulation sur ordinateur.

Il est souhaitable, cependant, de comprendre les données fondamentales des diverses sciences mathématiques, de connaître les types de problèmes qu'elles peuvent traiter, et les règles pratiques de leur emploi. Sans doute vaudrait-il mieux reprendre toutes les démonstrations théoriques, pour être capable d'apprécier les cas limites d'emploi, mais cette gymnastique n'est pas indispensable. A titre d'exemple précis, la méthode de Monte-Carlo suppose connues, les lois de répartition de probabilité. Un tableau dans le genre de celui de l'Annexe 4.2 nous semble un résumé suffisant pour un travail ordinaire de simulation, à condition d'avoir déjà effectué un certain nombre d'exercices pratiques concernant ces distributions.

Deux points sont à considérer quand on aborde le problème du niveau de connaissances mathématiques nécessaires à la simulation des systèmes. Tout d'abord, la simulation d'un système complexe ne peut être confiée à un seul chercheur, mais à une équipe dans laquelle des mathématiciens ont leur place. Le deuxième point est lié au progrès de la programmation. Il existe, en effet, de nombreux sous-programmes qui traitent des problèmes particuliers de mathématiques, comme par exemple, le programme d'ordinateur Aléano de notre application qui génère des nombres pseudo-aléatoires satisfaisant à une distribution normale. La tendance est d'en accroître sans cesse le nombre, et de les mettre à la disposition des utilisateurs, dans des banques de programmes. Il suffit donc de les connaître et de les appliquer à bon escient.

L'idéal serait assurément d'allier des connaissances mathématiques très poussées, aux qualités requises pour réussir une simulation. Celles-ci ne relèvent pas uniquement des talents que nous reconnaissons tous aux mathématiciens. Elles englobent le sens de l'efficacité, la connaissance des affaires, la nécessité de maintenir le contact avec le réel, l'expérience des relations publiques pour pénétrer le milieu et convaincre, enfin un jugement pratique et une grande facilité d'adaptation.

4.3 TECHNIQUES DE SIMULATION

Dans le monde et dans la vie, le hasard intervient et l'homme sait par expérience qu'il y a là un phénomène complexe. Pour simuler un système réel, il faut avoir la possibilité de créer l'aléatoire, ne serait-ce que pour déterminer les heures d'arrivée des clients dans un magasin, ou pour calculer le temps que chacun met pour faire ses achats. Par ailleurs, le temps est un élément fondamental de toute simulation ; il convient de comprendre le rôle exact de ce facteur. C'est pourquoi nous avons rangé dans les techniques de simulation, les méthodes pour créer : des nombres aléatoires, des variables aléatoires de loi donnée et le temps simulé, ainsi que les techniques de réduction de variance et la convergence statistique des simulations.

A - CREATION DE NOMBRES ALEATOIRES

La génération de variables aléatoires indépendantes et uniformes est déjà intéressante en soi. Elle l'est aussi parce qu'elle constitue le premier stade de la création de variables aléatoires indépendantes, de loi donnée ; celles-ci, en effet, sont obtenues en transformant les premières par un procédé déterministe.

Pour obtenir des suites de variables uniformes, il existe plusieurs méthodes :

- Méthodes manuelles
- Utilisation de tables
- Méthodes analogiques
- Méthodes arithmétiques

La première qualité d'une méthode utilisée pour la simulation sur ordinateur, est d'être économique. A cet effet, elle doit être rapide, utilisable à tout moment ; elle ne doit, ni immobiliser beaucoup de mémoires, ni faire intervenir un matériel particulier coûteux ; par ailleurs, une suite de variables doit pouvoir être répétée, pour permettre son analyse, avant utilisation. Enfin, elle ne

doit pas se reproduire rapidement. Nous examinerons les différentes méthodes de génération de variables, en tenant compte de ces critères.

METHODES MANUELLES

Les méthodes manuelles sont les plus simples, mais aussi les plus lentes. Elles consistent à créer des nombres aléatoires à l'aide de dés, (il en existe à 20 faces), de cartes, ou de pièces de monnaie. Les roulettes de casino, les machines de la loterie nationale, ou tout autre appareil de ce genre, ne sont pas plus rapides. Les suites ainsi obtenues sont de bonne qualité, mais ne peuvent pas être répétées. Par contre, elles peuvent servir à composer des tables de nombres aléatoires. Les méthodes manuelles ne sont utilisées en simulation qu'occasionnellement, sur de petits ordinateurs.

TABLES DE NOMBRES ALEATOIRES ENTIERS

La "Rand Corporation" a publié, la première, une suite de un million de variables aléatoires entières, indépendantes et uniformes. Ces nombres créés à l'aide d'un ordinateur analogique, ont été enregistrés sur cartes perforées et sur bandes magnétiques. Ils peuvent donc être utilisés directement sur ordinateurs, pour des simulations peu importantes, mais imposent un temps d'extraction élevé. Ils ont l'avantage de pouvoir être répétés. Si un programme de simulation exige des nombres aléatoires de 2 chiffres par exemple, ceux-ci peuvent être enregistrés sur des cartes perforées de 80 colonnes, par lots de 40 par carte, et stockés dans une aire K (M), avec une simple instruction Fortran du type :

```
READ 1, (K (M), M = 1,40)
```

```
1 FORMAT(40 (I2))
```

Quand le premier lot de 40 nombres est épuisé, un deuxième peut aussitôt être enregistré dans l'aire utilisée. C'est une méthode simple qui immobilise peu de mémoires.

Pour que l'emploi de tables se généralise sur ordinateur, il faudrait réduire considérablement le temps d'accès. La mise en service des mémoires cylindriques, rapides, et d'énormes capacités, devrait valoriser les tables. Néanmoins, leur utilisation posera toujours une énigme : l'influence d'un hasard engendré par la même table.

METHODES ANALOGIQUES

La méthode consiste à reconstituer un processus aléatoire physique pour obtenir une suite de variables de loi donnée, qui sera transformée en suite uniforme. C'est ainsi qu'un compteur de Geiger, enregistrant le nombre de tops émis par un corps radioactif, à intervalles réguliers, définit une suite de variables de Poisson. La même suite est obtenue par l'écrêtage d'un bruit blanc, en comptant, par unité de temps, le nombre d'impulsions au-delà d'une amplitude donnée.

Des ordinateurs analogiques sont utilisés pour la génération de variables aléatoires. On cherche actuellement des moyens économiques et rapides, pour faire profiter les ordinateurs digitaux de ces diverses sources d'aléatoire, dont la production est d'excellente qualité. Toutefois, les suites ainsi obtenues ont, comme celles des méthodes manuelles, l'inconvénient de ne pas pouvoir être répétées, compliquant de ce fait, la vérification des calculs.

METHODES ARITHMETIQUES

Les suites fournies par les méthodes arithmétiques ont, par contre, l'avantage de pouvoir être répétées, car elles sont créées en utilisant des algorithmes déterministes. Ce sont donc des créations de l'homme. Or l'homme n'est pas le maître du hasard : c'est pourquoi, d'une part, ces suites sont appelées pseudo-aléatoires, et

d'autre part avant d'être acceptées comme aléatoires, elles doivent passer un certain nombre de tests statistiques.

C'est Von Neumann qui, en 1946, a utilisé pour la première fois, une suite aléatoire de cette nature. Il l'avait obtenue par la méthode du milieu du carré. Soit un nombre quelconque x_0 de 3 chiffres : 217. x_1 est le nombre formé par les 3 chiffres du milieu du carré de x_0 . Il en est de même pour x_2 à partir de x_1 etc... Si le carré comporte 6 chiffres, le nombre est formé à partir du chiffre des dizaines

$$\begin{array}{rclclcl} x_0 = 217 & x_0^2 = 48089 & = & 4 & | & 808 & | & 9 \\ x_1 = 808 & x_1^2 = & = & .. & | & ... & | & . \end{array}$$

Ainsi est composée la suite :

217, 808, 286,

Un ordinateur numérique peut donc d'une façon simple engendrer une suite pseudo-aléatoire, sans encombrer les mémoires : il suffit de lui fournir le nombre initial, 217 par exemple, et de stocker le sous-programme suivant, qui sera appelé à la demande.

Sous-programme ALEA (M)

$N = M * 2/10$

$K = N/1000$

$M = N - K * 1000$

RETOUR

FIN

Cette méthode n'est pratiquement plus utilisée, mais elle a été le point de départ de toutes les autres. Elle a pour elle de bien cacher sa loi de formation ; contre elle, d'être encore trop lente, difficilement analysable, de s'arrêter lorsque le nombre obtenu

n'est composé que de zéros, d'avoir une périodicité faible, et surtout de ne pas satisfaire aux tests statistiques. Elle a été remplacée par les méthodes congruentielles, mises au point par Lehmer en 1951.

METHODES CONGRUENTIELLES

Les méthodes congruentielles font intervenir la théorie des nombres et celle des groupes finis. Elles ne demandent que peu de calcul et n'encombrent pas les mémoires. Les suites sont du type $x_n = f(x_{n-1})$. Seul x_{n-1} est conservé en mémoire et en reprenant le même x_0 , on peut répéter la suite.

Les méthodes congruentielles comprennent les méthodes :

- additives
- multiplicatives
- mixtes

Les premières du type :

$$x_n = x_{n-1} + x_{n-k} \pmod{m}, \text{ avec } k > 0$$

sont peu utilisées, car les deux suivantes fournissent des résultats de meilleure qualité.

Le tableau ci-après fixe les conditions nécessaires, sur le choix des paramètres, pour que la période soit la plus grande possible. Toutes ces conditions peuvent être démontrées.

: Méthodes Congruentielles :	: Définition des paramètres et choix des : : conditions nécessaires pour que la pé- : : riode T soit la plus grande possible. :
: multiplicatives : $x_{n+1} = ax_n \pmod{m}$	: $m = p^k$: $p =$ base de numération : : $= 2$, ordinateurs binaires : : $= 10$, ordinateurs décimaux : : $k \leq$ nombre de bites : : : a du même ordre que $\sqrt{m}$: : x_0 premier avec m : : Ordinateurs binaires : si $m = 2^k$: : $a = \pm 3 \pmod{8}$: : $T_M = 2^{k-2}$: : Ordinateurs décimaux : si $m = 10^k$: : $a = \pm (3, 11, 13, 19, 21, 27, 29, 37, 53, 59, 61,$: : $67, 69, 77, 83, 91) \pmod{200}$. Tous : : ces nombres sont congruents à : : $\pm 3 \pmod{8}$: : $T_M = 10^{k-2}$:
: mixtes : $x_{n+1} = ax_n + b \pmod{m}$	: $m = p^k$: $p = 2$ ou 10 : : $k \leq$ nombre de bites : : $T = m$ si : : a du même ordre que $\sqrt{m}$: : $a \equiv 1 \pmod{\alpha}$ pour tout α : : facteur premier de m : : $a \equiv 1 \pmod{4}$ si m est divisible : : par 4 : : b premier avec m : : x_0 sans importance :

Les suites engendrées par des méthodes congruentielles ont, d'emblée, un certain nombre de qualités : elles sont rapides, elles immobilisent peu de mémoires, leur période est très grande, et on peut les répéter. Il reste à montrer qu'elles sont bien uniformes et indépendantes. C'est pourquoi on leur fait passer un certain nombre de tests, qui permettent d'éliminer les suites non valables. Ces tests, établis après analyse de suites aléatoires, définissent les qualités statistiques de ces nombres. On admet que des suites définies par un procédé déterministe et passant ces tests, peuvent être considérés comme pratiquement aléatoires.

TEST DE FREQUENCE

Le test de fréquence permet de vérifier l'uniformité d'une suite sur $(0,1)$. On découpe l'intervalle $(0,1)$ en α classes égales, dans lesquelles on range les N termes de la suite. On compte le nombre f_i d'éléments dans la i ème classe.

L'expression $\frac{\alpha}{N} \sum_{i=1}^{\alpha} (f_i - \frac{N}{\alpha})^2$ doit obéir à une loi de χ^2 à $\alpha-1$ degrés de liberté. On teste cette quantité par rapport à cette loi.

TEST DE SERIE

Ce test permet de voir si x_n et x_{n-1} sont indépendants l'un de l'autre. On découpe $(0,1)^k$ en α^k classes égales, $\alpha < 4$. Par exemple, on divise le carré $(0,1)$ en α^2 classes égales. Puis on compte le nombre de points x_i, x_{i-1} , appartenant à chaque classe et on vérifie l'uniformité de cette répartition par test χ^2 , à $(\alpha^k - 1)$ degrés de liberté. On se rend compte ainsi, que les suites de k termes consécutifs ne sont pas corrélées.

TEST DE CORRELATION

C'est une méthode plus directe d'étudier la corrélation entre les x_n . Soit une suite $X_1, \dots, X_n$ de N termes.

La quantité : $C_k = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i X_{i+k}$ doit obéir approximativement à une loi normale de moyenne $1/4$ et d'écart-type :

$$\sigma = \frac{13N-19k}{12(N-k)}$$

C est calculé successivement pour $k = 2, 3, 4, \dots$. On se limite en général aux faibles valeurs de k . On compare C à sa loi, à l'aide d'un test χ^2 .

TEST DE SEQUENCE

On partage une suite $X_1 \dots X_n$ en séquences consécutives. Ces séquences représentent des suites de X_i consécutifs : rangés dans un ordre croissant ou décroissant, ou tous supérieurs ou inférieurs à $1/2$. Puis, on classe ces séquences par longueurs. Enfin, on compare la statistique obtenue à la loi théorique de répartition des longueurs de ces séquences, à l'aide d'un test de χ^2 .

TEST D'INTERVALLE

On range les x_i les uns à la suite des autres. On choisit un chiffre, 9 par exemple, et on fait la statistique de la longueur des intervalles séparant deux apparitions successives de ce chiffre. Enfin, on compare la statistique obtenue à sa loi théorique, à l'aide d'un test de χ^2 .

Dès que les suites obtenues ont passé ces tests programmés sur ordinateur, elles peuvent être utilisées dans la construction et la manipulation des modèles.

B - GENERATION DE VARIABLES ALEATOIRES INDEPENDANTES DE LOI DONNEE

Les méthodes pour obtenir, à partir d'une variable aléatoire indépendante et uniforme sur $(0,1)$, une suite de variables aléatoires indépendantes de loi donnée, comprennent les méthodes générales et les méthodes particulières. Elles font toutes l'objet de démonstrations dans les livres de cours (2,30; 3,25 etc...). Nous ne retiendrons ici que les résultats et la façon de les programmer sur ordinateur.

La méthode de la fonction de répartition, la méthode de l'inverse de la fonction de répartition, et celle de rejet sont les plus connues, parmi les méthodes générales. La première est surtout utilisée pour les lois discrètes ; les deux dernières, pour les lois continues.

A LOIS CONTINUES D'USAGE COURANT

A,I Loi uniforme

Soit R_1 une variable aléatoire uniforme sur $(0,1)$

Soit X une variable aléatoire de la fonction de répartition

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx$$

Soit une variable aléatoire X de densité $f(x)$

Soit $E(X)$ l'espérance

Soit $V(X)$ la variance

La loi uniforme est définie par les fonctions et valeurs suivantes :

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad \text{si } x \in (a,b)$$

$$f(x) = 0 \quad \text{si } x \notin (a,b)$$

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad F(x) \in [0,1]$$

$$E(X) = \frac{b + a}{2}$$

$$V(X) = \frac{(b - a)^2}{12}$$

$$a = E(X) - \sqrt{3V(X)}$$

$$b = 2E(X) - a$$

on engendre : $X = a + (b - a) R$

$R \in]0,1[$

R = élément courant de la suite

Le sous-programme Fortran pour engendrer X ne comporte que 4 instructions :

1	Sous-programme UNIFOR (A,B,X)	:	appel
2	$R = \text{ALEA}(R)$	:	génération de R
3	$X = A + (B - A) * R$	:	calcul de X
4	RETOUR	:	fin du sous-programme

A,2 Loi exponentielle

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha x} \quad \text{si } x \geq 0, \alpha > 0$$

$$f(x) = 0 \quad \text{si } x < 0$$

$$F(x) = 0 \quad \text{si } x < 0$$

$$F(x) = 1 - e^{-\alpha x} \quad \text{si } x \geq 0$$

$$E(X) = \frac{1}{\alpha}$$

$$V(X) = \frac{1}{\alpha^2} = (E(X))^2$$

$$\alpha = \frac{1}{E(X)}$$

$$R = e^{-\alpha x}$$

$$X = -\frac{1}{\alpha} \log R = -E(X) \log R$$

1 Sous-programme EXPONE (E(X), X)

2 $R = \text{ALEA}(R)$

```

3  X  =  -E(X)  *  log R
4  RETOUR

```

A,3 Loi gamma

$$f(x) = \frac{\alpha^k x^{(k-1)} e^{-\alpha x}}{(k-1)!} \quad x \geq 0, k > 0, \alpha > 0$$

$$f(x) = 0 \text{ si } x < 0$$

Avec k entier :

$$X = - \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^k \log R_i$$

X obéit à une loi d'Erlang

Cette équation ne peut être utilisée en Fortran. Elle a été remplacée par l'expression :

$$X = - \frac{1}{\alpha} (\log \prod_{i=1}^k R_i)$$

$$\begin{aligned} E(X) &= \frac{k}{\alpha} \\ V(X) &= \frac{k}{\alpha^2} \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} \text{Formules de Pearson} \end{array} \right)$$

$$\alpha = \frac{E(X)}{V(X)}$$

$$k = \frac{(E(X))^2}{V(X)}$$

```

1  Sous-programme GAMMA (K, A, X)
2  TR  =  1.0
3  DO  =  5 I = 1, K
4  R(I) = ALEA (R)
5  TR  =  TR * R(I)
6  X  =  - LOG (TR) / A
7  RETOUR

```

Avec k demi entier, X est une variable χ^2 , à 2k degrés de liberté.

$$X = - \frac{1}{\alpha} \log \left(\prod_{i=1}^k R_i \right) + Z^2$$

Z^2 étant le carré d'une variable normale de moyenne 0, et de variance 1.

Avec k quelconque,

$$k = (k) + \alpha, \quad (k) \text{ partie entière de } k$$

$$\text{on engendre } X_1 = \gamma((k), \alpha)$$

$$X_2 = \gamma((k) + 1, \alpha)$$

On prend pour X , X_1 ou X_2 tirées au sort, avec les probabilités respectives α et $(1 - \alpha)$.

A,4 Loi bêta, $\beta(a, b)$

$$f(x) = \frac{\Gamma(a+b) x^{a-1} (1-x)^{b-1}}{\Gamma(a) \Gamma(b)}$$

si $X \in (0,1)$,

$$f(x) = 0 \text{ si } X \notin (0,1)$$

a et b correspondant à k_1
et k_2 des variables
gamma.

$$E(X) = \frac{a}{a+b}$$

$$V(X) = \frac{E(X)b}{(a+b+1)(a+b)}$$

La distribution Bêta est la distribution du quotient de 2 variables indépendantes Gamma X_1 et $(X_1 + X_2)$, ayant même α et tel que $k=k_1+k_2$, paramètre de (X_1+X_2) .

$$X = \frac{X_1}{X_1 + X_2}$$

$X \in (0,1)$

X_1 suit une loi $\gamma(a, \alpha)$

X_2 suit une loi $\gamma(b, \alpha)$

X suit une loi $\beta(a, b)$

1 Sous-programme Gamma (K, A, X)

$K = K_1$

2 TR = 1.0

3 DO 5 I = 1, K

4 R(I) = ALEA (R)

5 TR = TR * R(I)

6 X = - log (TR) / A

```

7  Sous-programme gamma (L, B, Y)      L = K1 + K2
8  TR = 1.0
9  DO 11 I = 1, L                      B =  $\frac{E(X_1 + X_2)}{V(X_1 + X_2)}$ 
10 R(I) = ALEA (R)
11 TR = TR * R(I)
12 Y = - Log (TR) / B
13 X = X/Y
14 RETOUR

```

A,5 Loi normale

Méthode approximative

$$X \sim \sqrt{\frac{12}{k}} \left(\sum_{i=1}^k R_i - \frac{k}{2} \right)$$

X suit quasiment une loi normale centrée réduite, avec $k = 24$.
Avec $k = 12$, on obtient déjà de bons résultats.

Méthode exacte

On engendre deux variables normales centrées réduites et indépendantes X et Y.

$$\begin{aligned} X &= (-2 \log R_1)^{1/2} \cos 2 \pi R_2 \\ Y &= (-2 \log R_1)^{1/2} \sin 2 \pi R_2 \end{aligned}$$

En utilisant la première méthode avec $k = 12$, le programme s'écrit :

```

1  Sous-programme NORMAL (X)
2  SUM = 0.0
3  DO 5 I = 1,12
4  R(I) = ALEA (R)
5  SUM = SUM + R(I)
6  X = SUM - 6.0
7  RETOUR

```

B LOIS DISCRETES USUELLES

B,1 Variable aléatoire de Bernoulli

$X = 0$ avec la probabilité q (échec)

$X = 1$ avec la probabilité p (succès), $p + q = 1$

$$X = 0 \text{ si } R \leq q$$

$$X = 1 \text{ si } R > q$$

$$q \in]0,1[$$

B,2 Variable de Pascal

On simule une variable de Pascal, à partir d'une variable de Bernoulli, en comptant, à chaque fois, le nombre de tirages nécessaires sur une variable X de Bernoulli, pour obtenir la valeur $X = 1$, de première probabilité p .

$$f(x) = pq^x \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

$$F(x) = 1 - q^{x+1}$$

$$E(X) = \frac{q}{p}$$

$$V(X) = \frac{q}{p^2} = \frac{E(X)}{p}$$

$$p = \frac{1}{1 + E(X)}$$

$$q = \frac{E(X)}{1 + E(X)}$$

$$X = \text{partie entière de } \frac{\text{Log } R}{\text{Log } q}$$

```

1  Sous-programme PASCAL (K, Q, X)
2  TR  =  1.0
3  QR  =  Log (Q)
4  DO 6 I = 1, K
5  R(I) = ALEA (R)
6  TR  =  TR * R(I)
7  NX  =  LOG (TR) / QR
8  X   =  NX
9  RETOUR

```

B,3 Loi binomiale

C'est, par définition, la somme de n variables de Bernoulli. Il suffit donc de simuler n variables de Bernoulli, et d'en faire la somme

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \frac{n}{x} p^x q^{n-x} & x &= 0, 1, 2, 3, \dots, n \\
 E(X) &= np & p + q &= 1 \\
 V(X) &= npq \\
 p &= \frac{(E(X) - V(X))}{E(X)} \\
 n &= \frac{E(X)^2}{E(X) - V(X)}
 \end{aligned}$$

Le sous-programme, ci-dessous, est l'expression de la définition de la loi binomiale. On suppose p et n connus, $X_0 = 0$; pour chaque X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) on fait le test et le choix suivants :

$$\begin{aligned}
 \text{si } R_i \leq p & \quad X_i = X_{i-1} + 1 \\
 \text{si } R_i > p & \quad X_i = X_{i-1}
 \end{aligned}$$

```

1  Sous-programme BINOM (N, P, X)
2  X  =  0.0
3  DO 7 I = 1, N
4  R(I) = ALEA (R)

```



```

4  R(I) = ALEA (R)
5  IF (R(I) - P) 6,6,9
6  S = 1.0
7  X = X + 1.0
8  GO TO 10
9  S = 0.0
10 P = (TN * P - S) / (TN - 1.0)
11 TN = TN - 1.0
12 RETOUR

```

B,5 Loi de Poisson

$$f(x) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} \quad \begin{array}{l} x = 0, 1, 2, \dots \\ \lambda > 0 \end{array}$$

$$E(X) = \lambda$$

$$V(X) = \lambda$$

Si on engendre une suite de variables exponentielles: $T_1, T_2, \dots, T_n$, de paramètre 1, x est défini par :

$$\sum_{i=1}^x T_i < \lambda < \sum_{i=1}^{x+1} T_i \quad \text{avec } T_i = -\text{Log } R_i$$

Cette inégalité est écrite sous la forme suivante, mieux adapté à l'ordinateur :

$$\prod_{i=0}^x R_i \geq e^{-\lambda} > \prod_{i=0}^{x+1} R_i$$

```

1  Sous-programme POISSO (P, X)      B = e-λ
2  I = 0.0                          P = λ
3  B = EXP(-P)
4  TR = 1.0
5  R(I) = ALEA (R)
6  TR = TR * R(I)

```

```
7 IF (TR - B) 8, 10, 10
8 I = I + 1.0
9 GO TO 5
10 X = I
11 RETOUR
```

C - LA VARIABLE TEMPS

Dans un modèle de simulation, la variable temps est capitale, car elle intervient pour synchroniser les éléments constitutifs du modèle, et pour ordonner les activités. Il existe deux méthodes pour faire avancer la simulation et calculer le temps simulé : la méthode "à pas constant" et celle "à pas variable".

METHODE A PAS CONSTANT

L'horloge avance toujours d'un intervalle de temps fixe, compté ou en secondes ou en minutes ou en heures etc... et déterminé avant le déroulement du programme sur ordinateur. Cette méthode simple est facile à programmer. Elle s'applique de préférence, lorsque le modèle est régi par une équation différentielle, quand les événements ou décisions se produisent à intervalles réguliers, par exemple pour des vérifications périodiques de stocks, ou encore, lorsque les événements d'un système sont mal connus.

L'ordinateur recherche si des opérations doivent avoir lieu durant la période fixée : celles qui seraient prévues seront exécutées ponctuellement. Pour obtenir une bonne précision, il y a intérêt à adopter un petit pas, car la période devient l'unité de temps de la simulation. Si celle-ci est de 60 minutes, toutes les opérations de cette période seront enregistrées à l'heure ronde. Ce qui ne va pas sans entraîner des approximations et par là une nouvelle source d'imprécision. Si le pas est petit, la précision s'en trouve accrue ; mais comme un examen systématique des événements éventuels a lieu à chaque période, il est fait même quand rien ne se passe. Si la période choisie est de 1 minute, et si aucune opération ne se produit pendant une journée, 1440 examens auront eu lieu en pure perte.

Dans la méthode à pas constant qui, d'une façon générale, nécessite un temps de calcul important, le choix de l'intervalle de temps résulte d'un compromis entre la précision souhaitée et l'efficacité désirée de la simulation. La base de temps choisie pour la simulation du port d'Oslo, par exemple, est de 3 minutes, soit $1/20^{\text{e}}$ d'heure (1,11).

METHODE A PAS VARIABLE

Quand les changements d'état du système arrivent à intervalles irréguliers, ou que le système est statique pendant de longues périodes, la méthode à pas variable est beaucoup plus économique. Sa précision est excellente, car le temps avance lorsque l'événement se produit. Ce dernier peut être programmé, si besoin est, au millième de seconde. L'horloge est donc remplacée par une suite d'opérations qui se passent à des intervalles de temps variables. L'ordinateur ne fait alors aucun examen inutile.

Un calendrier des événements sert de base à l'avancement de la simulation, comme le montre la figure 4.3c. Les événements exogènes sont placés dans un calendrier, par ordre chronologique. L'horloge avance au temps prévu pour le premier événement, qui est identifié par le programme : par exemple, l'ouverture d'une file d'attente. Un sous-programme approprié est appelé et alimenté pour exécuter cet événement ; au cours de cette opération, l'ordinateur calcule les heures de réalisation des événements éventuels induits. Puis l'événement exécuté est retiré du tableau. Les événements endogènes sont insérés à leur place, dans le calendrier. Quand celui-ci est mis à jour, l'horloge avance à l'heure de l'événement figurant en tête de liste, c'est-à-dire au pas suivant. Le sous-programme approprié est appelé, et le procédé continue, jusqu'à épuisement du calendrier. L'historique de la simulation est tenu à jour, au fur et à mesure du déroulement des événements.

La méthode de simulation à pas variable est, de loin, la plus fréquemment utilisée. On l'appelle aussi simulation asynchrone, ou sans horloge, ou par événement, réservant à la méthode à pas fixe les appellations de : synchrone, ou à l'horloge.

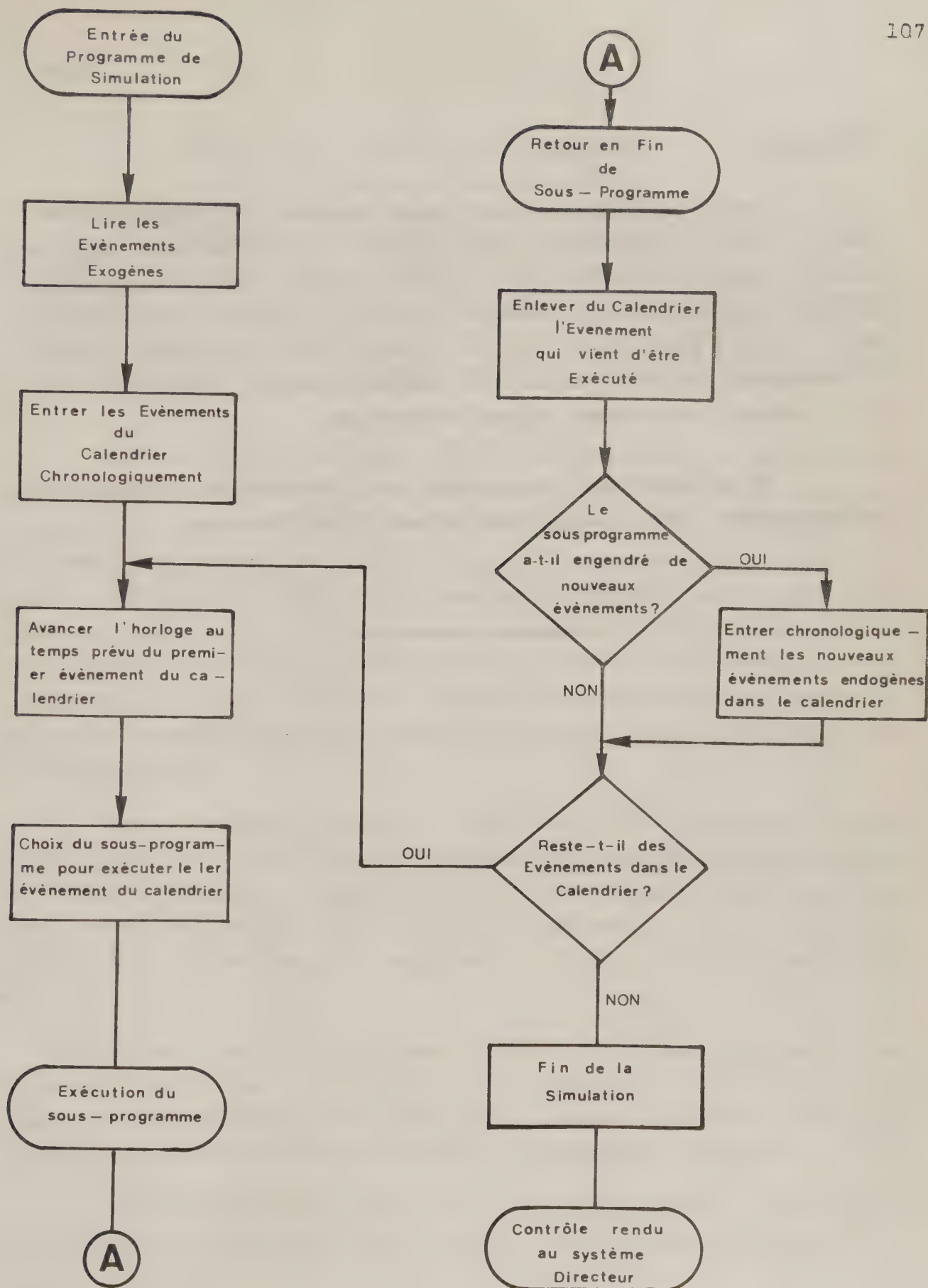


Figure 4-3C

CONCLUSION

Les deux méthodes pour faire avancer le temps montrent bien le rôle du calendrier dans lequel les événements sont en attente jusqu'à ce qu'un signal d'horloge les réactive, à intervalles réguliers ou à la demande. Quand un processus est déclenché, il prend place dans la file jusqu'à son changement d'état. Un événement ne sort de sa file que pour entrer dans une autre où il attend le prochain signal d'horloge.

En simulation, la gestion de l'échéancier est donc intrinsèquement liée à la gestion d'une file d'attente.

D - TECHNIQUES DE REDUCTION DE VARIANCE

Les techniques de réduction de variance ont un double but : d'une part, diminuer la durée des simulations pour réduire le coût, d'autre part, augmenter la précision avec le même nombre de passages sur ordinateurs. Elles comprennent, entre autres, les méthodes d'échantillonnage conditionnel, d'échantillonnage d'importance et de comparaison.

L'échantillonnage conditionnel est utilisé, en particulier, dans la simulation des effets des armes et des engins. Si un engin ne fonctionne pas, l'objectif n'est ni détruit, ni endommagé : il n'est donc pas nécessaire, dans ce cas, de poursuivre l'expérience jusqu'à son terme. Le résultat obtenu en supposant que l'engin fonctionne, est multiplié par la probabilité de son fonctionnement. D'une façon générale, on applique cette méthode, en fixant une valeur à la variable, en faisant un certain nombre d'expériences avec cette valeur et en pondérant les résultats suivant la loi de probabilité de la variable fixée.

Dans l'échantillonnage d'importance, les événements inhabituels ou importants sont simulés séparément, à haute fréquence. Quand un système a tendance à devenir explosif, la situation est réétudiée plusieurs fois de suite, avec des aléas différents, pour suivre l'évolution du système jusqu'à l'explosion, ou le retour à l'état normal.

La méthode de comparaison conduit à une simplification, en réduisant l'influence des variables aléatoires. Pour ce faire, on compare deux stratégies par exemple, en prenant les mêmes aléas, qui n'auront pas grande influence sur les différences observées.

Ces méthodes font partie des astuces du métier, pour éliminer les temps de simulation inutiles et accroître la précision.

E - CONVERGENCE STATISTIQUE DES SIMULATIONS

Il existe deux types de processus aléatoires à simuler : les premiers sont limités dans le temps. La simulation s'arrête au terme prévu. Telles sont la plupart des simulations militaires.

Les seconds sont indéfinis dans le temps et dans ce cas, il s'agit d'obtenir, au plus bas prix, des résultats simulés, applicables aux paramètres du processus étudié. A cet effet, il convient de définir la précision souhaitée et, pour l'acquérir, de déterminer la durée de la simulation.

Découlant des modes de convergences stochastiques, des règles pratiques ont été étudiées et mises à la disposition des analystes, pour régler la durée des simulations de ces processus à évolution perpétuelle (2.3).

4.4 LANGAGES DE SIMULATION

Les premiers programmes de simulation étaient exprimés en langage machine, puis en langage assembleur. Ils étaient adaptés à chaque problème particulier. Les premiers compilateurs d'Algol et de Fortran sortirent avant la production des ordinateurs de la deuxième génération. Ils étaient spécialement orientés vers la résolution de problèmes scientifiques. Comme ils apportaient de grandes facilités pour la rédaction des programmes, et des réductions importantes du temps de programmation, en comparaison des langages machine et assembleur, leur succès fut immédiat.

Cependant les analystes chargés de préparer les programmes de simulation se rendirent compte à l'usage, que les Fortran et Algol, n'étaient plus assez adaptés à leurs problèmes. La simulation est, en effet, une expérimentation qui exige la construction de modèles se reproduisant, au moins partiellement, et constituant des familles. De plus, le même programme repasse de nombreuses fois sur ordinateur, en fait à chaque changement de paramètre, et toute modification de programme est laborieuse. Enfin, une étude de simulation, avec un des langages de base, exige des mois et pour des situations complexes, des années. Si bien que la méthode perd de son intérêt, en particulier dans le domaine des affaires susceptibles de changements rapides. *Il fallait donc, à tout prix, gagner du temps en simplifiant, et réduire le coût.*

La première étape a consisté à mettre sur pied des modèles généraux écrits en Fortran et Algol, pouvant s'adapter à un grand nombre de situations d'un même type. Mais l'expérience a montré que l'adaptation était rendue difficile, en raison de la complexité des modèles et aussi du langage de programmation. C'est alors que les premiers langages de simulation ont vu le jour vers 1960, parce qu'il fallait *simplifier le travail des analystes et des programmeurs, pour abréger la préparation des programmes.*

La définition, les caractéristiques, l'analyse et les possibilités des langages de simulation nous aideront à apprécier leurs avantages, leurs limites et leur avenir.

DEFINITION

L'expression "langage de simulation" couvre le langage proprement dit, c'est-à-dire l'ensemble des instructions qui permettent de définir un modèle, et le système de programmation qui, entre autres, traduit ce langage sur ordinateur. Elle est donc assimilée à un système de programmation spécial pour simulation, comprenant lui aussi le langage et le système qui transforme les instructions en langage machine, qui assure le déroulement du programme et dispose enfin les sorties. Cette assimilation s'explique par le fait que les langages de simulation sont les derniers arrivés, venant après les langages de base qui possédaient déjà leurs compilateurs et leurs systèmes. Les langages de simulation ont donc été étudiés globalement dès leur création. Ils nécessitent deux compilateurs : l'un pour le langage, l'autre pour le système d'ordinateur particulier. C'est la raison pour laquelle ces langages sont liés à des ordinateurs spécifiques, et quelquefois à une famille d'ordinateurs.

Leur prolifération a été rapide : en quelques années on en compte déjà une vingtaine. Le tableau 4.4-1 en donne la liste par ordre alphabétique, avec leurs auteurs, leur langage de base, l'implantation machine. Près de 50% d'entre eux ont comme langage de base le Fortran, et 25%, l'Algol.

Les inventeurs de langages de simulation ont cherché, tout d'abord, à donner un cadre adaptable à un grand nombre de situations, et des moyens pour dégager le modèle du système plus aisément, puis à réduire la durée nécessaire à la transformation du modèle en programme d'ordinateur comme aussi aux modifications du modèle, et enfin à présenter les résultats de la manipulation sous une forme directement exploitable.

LANGAGES DE SIMULATION	LANGAGES DE BASE	IMPLANTATION MACHINE	AUTEURS	REMARQUES
CSL	FORTRAN	IBM 7090, 1620, 1410 Honeywell 200/2200 400/1400	BUXTON & LASKI: IBM-GB & ESSO PETROLEUM CO.,	Connu-Compilateur disponible
DYNAMO	Ressemble au FORTRAN	IBM 7090, 709	PHYLLIS FOX & PUGH: MIT	"Industrial dynamics models"
ESP	ALGOL	Elliot 503	WILLIAMS: ELLIOTT Co	
FORSIM	FORTRAN & CSL	IBM 7030	FAMOLARI: MITRE	Sous-programme FORTRAN Adaptation du CSL
GASP	FORTRAN	IBM 1620, 7070, 7090 CDC G 20	KIVIAT: US STEEL	Sous-programme FORTRAN
GPSS	Aucun	IBM	GORDON: IBM USA	Très connu-Compilateur disponible même sur 360
GSP	Aucun	Ferranti Pegasus Elliot 503	TOCHER: UN. STEEL GB	
MILITRAN	FORTRAN	IBM 7090	SHAPIRO: Systems Research Grp.	— Lancé par la Marine US — Adapté aux problèmes militaires.
MONTECODE	AUTOCODE	Ferranti Pegasus	BUXTON & HEAD: British Iron & Steel	
MSS			IBM	Stade expérimental
OPS ₃		IBM 7094	MIT	Temps partagé-Stade expérimental
OPS ₄	PL/1		MIT	
QUICK-SCRIPT	SIMSCRIPT	CDC G 20	TONGUE & KELLER: Carnegie Institute	Adaptation du Simscript
SIMCOM	Aucun	G. E.	GENERAL ELECTRIC	Blocs descriptifs
SIMSCRIPT	FORTRAN	IBM 7090, 7040, 360 CDC 3600	MARKOWITZ: Rand Co.	Très connu-Compilateur disponible même sur 360
SIMON	ALGOL	Elliot 503, 803	HILLS: Bristol College	
SIMPAC	SCAT	IBM 7090	LACKNER: Syst. Dev. Co.	
SIMTRAN	SIMSCRIPT	IBM 7030	DOWLING: IBM	Adaptation du Simscript
SIMULA	ALGOL	UNIVAC 1107, 1108	NYGAARD & DAHL: Norvège	
SOL	ALGOL	BURROUGHS	KNUTH: Calif. Institute	
WASP	SIMSCRIPT & ALGOL	BURROUGHS B 5000	ROUSSEAU & DOVE: Westinghouse	Adaptation du Simscript en Algol

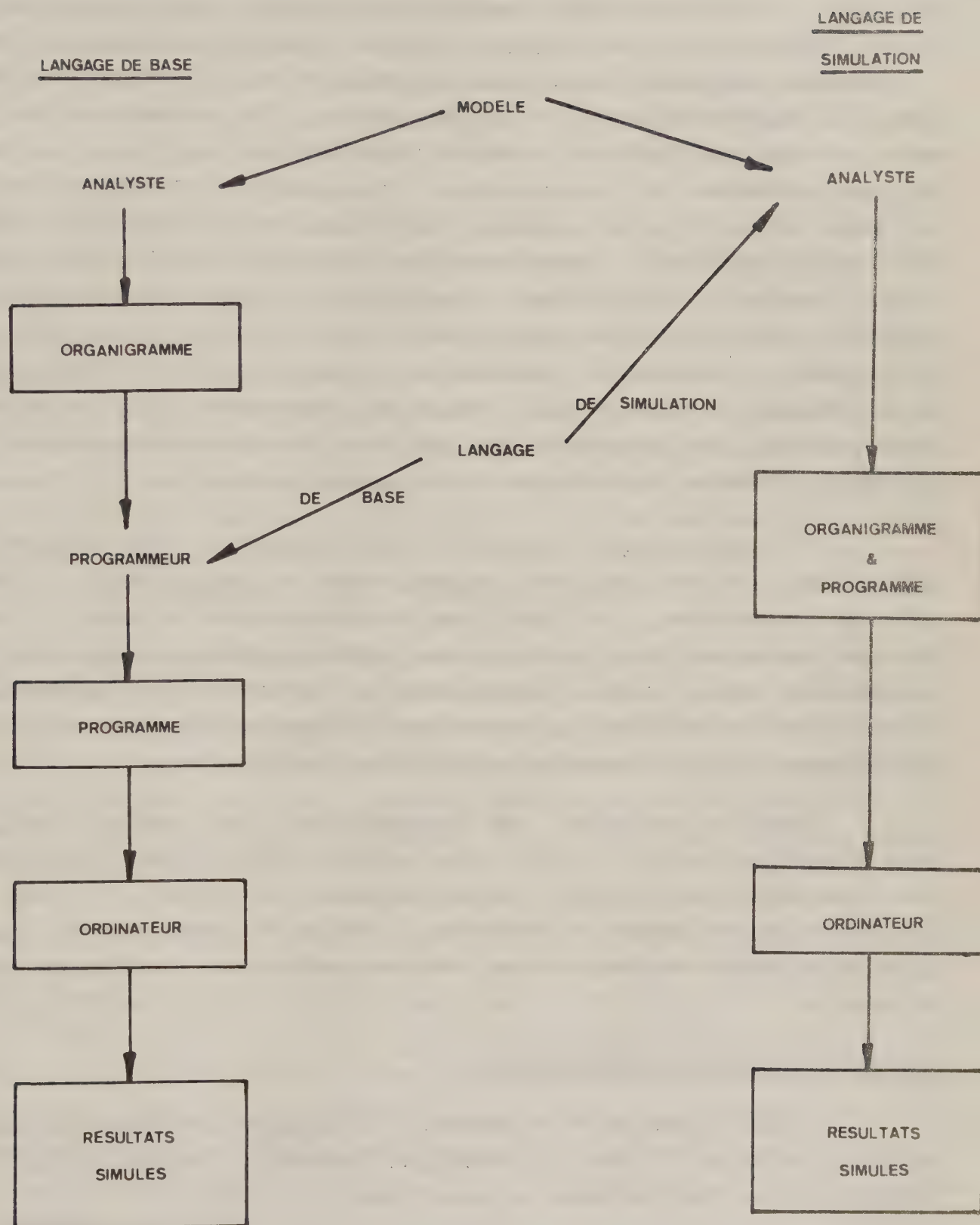
CARACTERISTIQUES GENERALES

Les langages de simulation ont tout d'abord une double caractéristique sémantique qui leur est propre et qui leur permet d'assurer, nous l'avons vu, *la gestion d'un échéancier et la gestion de files d'attente*.

Ils ont ensuite un certain nombre de points communs, inhérents à la méthode, qui les rendent différents des langages de base, scientifiques, ou de gestion. Ces points concernent la construction du modèle, la rédaction et le déroulement du programme.

Les langages de simulation aident l'analyste à formuler le modèle. Ils lui offrent des blocs descriptifs, des opérateurs, des tableaux clés, qui suggèrent souvent la bonne méthode pour aborder le problème, et qui rendent facile toute modification du modèle. Ils permettent aussi de considérer comme une seule étape: construction du modèle et rédaction du programme. Car l'expérience montre que la plupart des études de simulation sont traitées par les ingénieurs et les analystes, en dehors des programmeurs. Cet état de fait tient à deux causes : la première concerne la difficulté d'expliquer ces problèmes complexes à des programmeurs. Par ailleurs pour déceler les erreurs logiques de ces programmes, il faut bien connaître à la fois le sujet et le programme. La deuxième cause tient à la simplification envisagée pour construire et programmer le modèle en même temps, comme le montre la figure 4.4-2.

La rédaction du programme est le résultat d'une traduction simple et directe de l'organigramme. En outre, les instructions sont adaptées aux problèmes de simulation et sont étudiées de telle sorte que l'ordinateur les transforme, de façon automatique, en instructions détaillées qu'il assimile. Un point commun important se rapporte au mécanisme de temps simulé qui est incorporé dans le langage, alors que normalement il est déterminé par le programmeur. L'horloge fait progresser le temps, par unité de temps ou à la demande, par exemple lorsqu'une transaction est terminée ou qu'une arrivée se produit. Le temps peut donc être constant, lié à des événements voire même aléatoire.



- FIGURE 4.4-2-SIMPLIFICATION DE CONSTRUCTION ET DE PROGRAMMATION D'UN MODELE, EN UTILISANT UN LANGAGE DE SIMULATION.

Le système de programmation des langages de simulation comprend des sous-programmes capables de localiser aussi bien les erreurs d'écriture et de langage que les erreurs de logique. Comme l'ordinateur se charge de la mise en mémoire et du retrait des données, la marge d'erreur s'en trouve réduite. Des procédures simples sont prévues pour modifier aisément le modèle, et pour fixer les conditions initiales de la simulation. Les premiers résultats simulés obligent souvent à reprogrammer. Les règles de programmation procurent cette souplesse et permettent des contrôles directs de l'analyste, pendant le déroulement du programme. Chaque langage dispose aussi de sous-programmes spécialisés dans la création de nombres et de variables aléatoires, nécessaires en particulier à l'application de la méthode de Monte-Carlo. Enfin des procédures simples permettent d'obtenir les résultats simulés, sous forme de statistiques, de synthèses, d'états analytiques ou de rapports détaillés.

On constate que, parmi les points communs des langages de simulation, les uns leur sont propres comme le temps simulé, la création de l'aléatoire, les facilités de construction du modèle ; tandis que les autres sont le fruit des perfectionnements apportés aux langages de base, comme l'arrangement et le retrait des données, la disposition des sorties, la recherche systématique des erreurs, l'arrêt automatique du programme après chaque passage, etc...

Pour un analyste, ces langages sont d'un emploi relativement simple et, lorsqu'ils sont bien adaptés au problème, disponibles sur le matériel en service, et correctement assimilés, le temps de programmation se compte en semaines, plutôt qu'en mois. Cette simplicité se paie par un temps et un coût de passage sur ordinateur plus élevés.

CARACTERISTIQUES DE CONSTRUCTION

Deux écoles se sont formées à l'origine des premiers langages de simulation, l'une patronnée par IBM-USA, l'autre par la Rand Corporation et les Sociétés britanniques.

Le GPSS (General Purpose Systems Simulation) d'IBM a été mis au point par Gordon et Efron. La structure du système à simuler

se présente sous la forme d'un organigramme, constitué par des blocs descriptifs types. Chaque bloc représente une action spécifique, caractérisant une opération élémentaire du système. Cette première école préconise donc un langage d'organigramme composé de blocs.

La seconde, plus classique, utilise la méthode habituelle de programmation. Ses têtes de file sont le Simscript de la Rand Corporation, et les GSP et CSL britanniques. Ces langages s'appuient sur des langages de base, principalement le Fortran et l'Algol, et bénéficient, de ce fait, de gros avantages : les langages sont déjà connus, les compilateurs existent ; par contre, les imperfections initiales subsistent et le codage amélioré de nouveaux ensembles adaptés à la simulation est difficilement réalisable, quand un langage ne peut que les coder grossièrement. D'un autre côté, la création d'un langage entièrement nouveau, pour des problèmes de simulation, demanderait un effort énorme qui inciterait l'auteur à l'adapter à d'autres tâches encore. L'unité descriptive de ces langages, correspondante au bloc du GPSS, est l'événement (Simscript), l'activité (CSL), et l'opération (SOL). - Tableau 4.4-3 -

Les systèmes de simulation axés sur l'événement divisent le modèle en sous-programmes, appelés événements, qui décrivent comment l'état du système change, quand ces événements se produisent : dans une file d'attente, l'arrivée est un événement, ainsi que le départ, ou le fait qu'un serveur, dans un magasin, devienne disponible. Ces événements, identifiés initialement par l'analyste, arrivent souvent d'une façon aléatoire.

Les sous-programmes "activités" décrivent aussi les changements d'état du système, mais non pas d'une façon instantanée comme les précédents. Un certain nombre de conditions sont à remplir pour que l'activité ait lieu, et celle-ci demande un délai pour s'accomplir. L'activité "départ" dans un magasin peut comprendre la prospection, l'achat, le règlement de la note et le départ. Dans ces sous-programmes, l'horloge est programmée pour indiquer les temps de changement des éléments constitutifs de l'activité. Le temps simulé progresse au fur et à mesure du déroulement des activités. Le Simscript est à base d'événements, ainsi que le Militran ; les CLS, Montecode, Simpac, ESP, Simon, sont à base d'activités et le GSP, lui, combine les deux formules.

LANGAGE DE SIMULATION	UNITE DESCRIPTIVE	TEMPS A PAS	NOMBRE DE SUITES ALEATOIRES	DISTRIBUTIONS		
				UNIFORME	NORMALE	EXPO. NEG
CSL	ACTIVITE	FIXE	INDEFINI	OUI	OUI	NON
GPSS	BLOC	FIXE	INDEFINI	OUI	NON	NON
GSP	EVENEMENT & ACTIVITE	VARIABLE	INDEFINI	OUI	OUI	OUI
SIMPAC	ACTIVITE	FIXE	1	OUI	OUI	NON
SIMSCRIPT	EVENEMENT	VARIABLE	1	OUI	NON	NON
SIMULA	ACTIVITE	VARIABLE	INDEFINI	OUI	OUI	OUI
SOL	OPERATION	VARIABLE	INDEFINI	OUI	OUI	OUI

LANGAGE DE SIMULATION	POSSIBILITES D'HISTOGRAMME	LIMITE DU NOMBRE DE CLASSES	CALCUL AUTOMATIQUE DE		LIMITE DU NOMBRE DE DISTRIBUTIONS
			LA MOYENNE	L'ECART - TYPE	
CSL	OUI	AUCUNE	NON	NON	AUCUNE
GPSS	OUI	100	OUI	OUI	100
GSP	OUI	AUCUNE	OUI	OUI	AUCUNE
SIMPAC	OUI	AUCUNE	OUI	OUI	AUCUNE
SIMSCRIPT	NON	AUCUNE	OUI	OUI	AUCUNE
SIMULA	OUI	AUCUNE	OUI	OUI	AUCUNE
SOL	OUI	AUCUNE	OUI	OUI	AUCUNE

- TABLEAU 4.4-3 - CARACTERISTIQUES DE CONSTRUCTION CONCERNANT CERTAINS LANGAGES DE SIMULATION.

Sol, Simula et MSS, ont comme unité descriptive, "l'opération", définie comme un ensemble d'activités liées dans le temps ou par un certain nombre de conditions. Avec ce type de programmes, l'ordinateur simplifie encore davantage le travail de l'analyste. En contrepartie le temps de passage sur ordinateur s'en trouve accru.

L'habileté requise pour construire un modèle et un programme de simulation est aussi à l'origine de deux écoles. L'école britannique estime que les problèmes de simulation ne peuvent être traités efficacement que par des spécialistes, instruits dans les mathématiques. C'est pourquoi leurs langages de simulation sont synthétiques, abrégés, et difficilement compréhensibles pour des programmeurs. L'école américaine pense au contraire, que ces langages doivent être faciles à apprendre, à se rappeler, et accessibles à tous, ingénieurs, analystes et programmeurs : tels le Simgen, le Gasp et le GPSS.

La façon de traduire le programme de simulation pour le rendre assimilable par l'ordinateur a été, dès le départ, variée. Les premiers programmes étaient écrits directement en assembleur, FAP ou SCAT, et en Fortran ou Algol. Gasp, Forsim IV, ne sont que des collections de sous-programmes, adaptés à la simulation en langage Fortran. Les langages particuliers des Simgen et GPSS sont d'abord traduits par l'ordinateur en Fortran, bénéficiant ainsi d'une riche collection de compilateurs.

L'année 1964 est considérée, en général, comme le début de la seconde génération des langages de programmation. Sol et MSS cherchent à faire la synthèse des avantages des GPSS et Simgen. Ils adoptent comme unité descriptive "l'opération". Les langages du début produisent des simulations valables, qui incitent leurs auteurs à considérer leurs oeuvres comme valables aussi. Ils ne sont donc pas changés fondamentalement, mais ils reçoivent de nombreux perfectionnements et corrections. Chacun s'enrichit de l'expérience des autres. C'est ainsi que sortiront des deuxièmes, et quelquefois troisièmes versions des GPSS, Simgen, CSL et GSP.

Nous constatons aussi la suppression des compilateurs de traduction dans un langage de base. Le Simscript, par exemple, ne passe plus par l'intermédiaire du compilateur Fortran. Désormais les langages ont leurs compilateurs propres et directs, ou bien ils utilisent la syntaxe des langages de base, et même des premiers langages de simulation, comme la Simtran. En outre, ils sont structurés pour faciliter, davantage, le travail des analystes ; ils deviennent plus descriptifs afin de confier au langage et au compilateur des tâches supplémentaires dont l'analyste est soulagé. Il y a donc un regroupement des conceptions et des buts. Les différences apparaissent, actuellement, dans l'organisation du modèle pour simuler l'évolution du système, et dans l'habileté à utiliser le langage en système de programmation.

Maintenant, le Simscript sert de base à un certain nombre de langages de simulation : Quick-Script, Simtran, Wasp. Quand on considère les avantages de cette formule, on peut se demander si on ne tend pas vers un langage de simulation général, qui servirait de base à des langages particuliers, adaptés à des familles de problèmes. Une deuxième tendance se dessine aussi : le rapprochement des langages de simulation sur ordinateurs numériques et analogiques, de façon à les rendre interchangeables. Déjà, des langages de simulation analogique sont disponibles sur ordinateurs numériques.

Remise en ordre, regroupement, standardisation, compatibilité, telles sont les tendances qui semblent prévaloir, à la suite de la prolifération rapide des langages de simulation.

ANALYSE ET POSSIBILITES DES LANGAGES DE SIMULATION

Pour mieux saisir la nature et les possibilités des langages de simulation, pour apprécier leurs différences et ressemblances avec les langages de base, nous avons présenté en annexe 4.4, ceux qui nous paraissent significatifs et nous avons donné un exemple. Celui-ci est le type même de simulation, à la portée immédiate des analystes et des ingénieurs.

AVANTAGES

Les caractéristiques et les possibilités des langages de simulation font déjà ressortir leurs avantages et leurs limites : il suffira de les grouper. Le langage, en effet, aide l'analyste à formuler le modèle, le débarrasse des petits détails de la programmation, l'aide à localiser les erreurs et à expliquer le modèle aux autres. Il facilite la manipulation du programme, les paramètres étant écrits en termes opérationnels plutôt qu'en termes de programmation, ce qui rend plus simple l'identification des paramètres à modifier. Surtout, la préparation de la simulation est beaucoup plus rapide et moins coûteuse. En contre-partie, pour passer sur ordinateur une certaine quantité de temps simulé, un programme écrit en langage de simulation demande plus de temps que s'il l'était en langage de base. Enfin, comme ces langages sont orientés le plus souvent vers des types particuliers de situations, ils sont de ce fait limités.

CONCLUSION

Le choix d'un langage pour traiter un problème de simulation n'est pas facile, mais il se trouve simplifié au départ par la nature du système à étudier. Si celui-ci ne comporte *ni échancier* *ni file d'attente*, un langage de base du type FORTRAN, ALGOL ou COBOL est suffisant. C'est la raison pour laquelle, dans l'application qui suit cette étude et qui ne comporte que du calcul numérique sur ordinateur, nous avons adopté FORTRAN, qui s'est révélé correctement adapté au problème.

Dans la gamme des langages de simulation, le choix est aussi simplifié par des considérations de matériel, de qualifications de personnel et de coûts. En effet, les compilateurs ne sont disponibles que sur certains types d'ordinateurs. En outre, analystes et programmeurs ne sont pas qualifiés pour utiliser tous les

langages. Une documentation détaillée n'a pas encore été établie pour chacun d'eux. Certains sont plus faciles à assimiler que d'autres. Par ailleurs, un analyste qui connaît bien le Fortran, aura tendance à étudier les langages de simulation qui ont la même structure. Il y a intérêt aussi à choisir un langage connu, largement employé et qui a fait ses preuves, car des erreurs du langage et du compilateur ont déjà été détectées. Enfin, entrent en considération le coût du temps de programmation et celui du passage sur ordinateur.

Il est évident qu'il vaut mieux utiliser un langage particulièrement adapté au problème étudié. S'il s'agit, par exemple, d'une file d'attente, GPSS est tout indiqué. Militran convient aux études militaires ; Simscript a un très vaste champ d'application. Pour résoudre des problèmes de simulation tactiques, économiques ou militaires, où le facteur temps est à considérer, GPSS, Simscript, Gasp et Wasp nous semblent convenir : le premier est facile à assimiler, les deux autres sont de la famille Fortran, et le dernier est du Simscript en Algol. Tous les quatre offrent une documentation solide. S'il s'agit d'une étude stratégique de longue haleine, le langage le plus adapté est à choisir. C'est pour de telles études que Dynamo, par exemple, a été conçu : peu diffusé, il ne sert qu'à une équipe de spécialistes.

Enfin, nous estimons qu'avec les programmes directeurs des grands ensembles d'ordinateurs, il sera possible d'utiliser pour un même problème de simulation, plusieurs langages de ce type, comme le sont actuellement ceux de base, pour les problèmes courants. Ainsi, le programme directeur appellerait des sous-programmes traités, chacun, dans différents langages de simulation, particulièrement adaptés aux sous-systèmes étudiés.

4.5 VALIDITE DES SIMULATIONS

La validité des simulateurs et des jeux d'entreprise ou militaires est assez facile à établir. D'une part, les acteurs sont à même d'apprécier le bénéfice qu'ils retirent des séances d'instruction, d'analyser la façon dont ils réagissent psychologiquement à l'exercice, et de juger de son caractère artificiel. Par ailleurs, professeurs et instructeurs peuvent mesurer la rapidité des progrès de leurs sujets. Le gain qu'apporte la simulation est évalué par comparaison. Deux équipes suivent un même programme d'instruction en utilisant, pour la première, les méthodes d'enseignement habituelles et en ajoutant pour la deuxième, les exercices de simulation. Ceux-ci sont valables, si la qualité de l'instruction est meilleure ou si, en maintenant le même niveau, on aboutit à une réduction des heures d'entraînement et du prix de revient. Cette valeur peut déjà être appréciée sur plan, par des spécialistes en pédagogie, mais son degré requiert l'expérience. Celle-ci, pour réduire les dépenses, est d'abord faite à échelle réduite, avant d'être généralisée. Pareille procédure ne peut malheureusement pas être suivie dans la simulation des systèmes économiques.

L'enjeu financier est en effet trop important pour mettre à l'essai le résultat d'une simulation, quand il s'agit d'un système. Par ailleurs, le but de la simulation est d'éviter précisément cette épreuve. D'un autre côté, avant de se lancer dans les réalisations, il faut être convaincu de ne pas faire fausse route. Certains prétendent qu'un modèle bien construit n'a pas besoin de subir de vérifications. Cette attitude peut satisfaire un chercheur, mais rarement celui qui prend la décision. C'est pourquoi il n'est pas superflu de prendre des mesures et de pratiquer bon nombre de tests, pour garantir la validité des résultats d'une simulation de système.

MODELE ET VALIDITE

Il convient de revenir à la notion de modèle, pour juger de la validité des résultats d'une simulation. Autrement dit, le modèle ne fournit pas les résultats du système qu'il représente. Ses prédictions ne sont pas celles du monde réel. Elles doivent, cependant, montrer l'orientation que prendrait le système dans les hypothèses retenues, sinon la simulation serait inutile. En outre, un modèle économique ne peut fournir des conclusions aussi précises que celles d'un modèle physique, car un facteur d'incertitude intervient en toute activité humaine.

La validité des résultats d'une simulation est tout d'abord affaire de logique. Le modèle a été construit dans un but précis. Il faut donc s'assurer d'abord que les résultats répondent bien à l'objectif fixé. Puis, les hypothèses retenues doivent être vraisemblables ; leurs divergences avec les faits connus sont à apprécier. Ensuite, le modèle doit avoir sa logique interne : les relations qui sont exprimées ne sauraient être seulement accidentelles, mais réelles. De plus, la qualité d'une simulation est en liaison directe, avec la qualité des données qui ont servi à la construction du modèle : ce dernier point est capital. Enfin, la validité des résultats des sous-programmes de simulation est une condition de la validité des résultats du modèle dans son ensemble.

Quand la simulation a pour but la construction d'un nouveau système, et qu'il n'est pas possible de collecter des données expérimentales, la validité des résultats dépend seulement de la logique, du jugement et de la compétence de l'ingénieur. Des résultats valables ne sont obtenus qu'à partir d'hypothèses réalistes, servant de base à une construction logique. Par contre, quand la simulation se fonde sur un système existant, afin d'en expliquer et prédire le comportement, un certain nombre de précautions, de mesures et de tests, permettent de garantir et d'évaluer la validité des résultats simulés.

MESURES ET EXPERIMENTATIONS

Une première précaution, avant de bâtir un modèle, consiste à discuter le projet, avec ceux qui connaissent bien le problème ou la situation. Leurs avis sur les hypothèses et sur les règles retenues, sont essentiels. Les règles d'utilisation, en particulier, doivent concorder entre système et modèle. Cette façon de faire, offre, en outre, l'avantage de convaincre plus facilement les utilisateurs, en présence des résultats simulés.

Nous avons déjà fait état des procédés utilisés, pour contrôler la validité d'un modèle. Il est possible, tout d'abord, de simuler un problème simple dont les résultats sont connus par une méthode analytique. Si les résultats concordent raisonnablement, il y a de fortes chances pour que le modèle soit valable. Puis, la simulation d'une situation historique, aux résultats connus, conduit à faire confiance, ou non, au modèle. Dans ce cas, il est essentiel de ne pas reprendre, pour la manipulation, des données expérimentales qui ont servi à construire le modèle, car une telle simulation serait sans valeur.

Enfin, il faut toujours vérifier la stabilité d'un modèle, simuler des situations marginales et analyser les résultats, pour tester la sensibilité du modèle aux variations de paramètres, en particulier de ceux qui sont considérés comme neutres.

TESTS D'HYPOTHESE

Quand la simulation s'applique à un système existant, la validité des résultats simulés peut être garantie, par comparaison avec des échantillons d'observations réelles. A cet effet, des tests d'hypothèse sont à la disposition des analystes.

Pour construire un modèle de ce type, on réunit une série de données expérimentales et on trace la courbe de densité de la distribution correspondante. On étudie l'allure générale de cette courbe, pour chercher à quelle loi appartient la distribution observée. Or les lois de Gauss et les lois binomiales sont symétriques ; les lois binomiales et de Poisson discontinues ; les lois normales et lognormales continues ; les phénomènes d'attente suivent

très souvent une loi de Poisson ; une loi normale s'accommode de phénomènes à causes additives, une loi lognormale de phénomènes à causes multiplicatives. Grâce à ces indications et surtout à l'habitude, il est possible de déterminer la nature de la loi statistique à laquelle les données observées et faites en nombre limité appartiennent, ou paraissent appartenir, ainsi que ses paramètres et en particulier la moyenne :

$$\bar{x} = \sum_i f_i x_i.$$

Les tests d'hypothèse ont pour but de comparer les résultats des distributions théoriques et réelles. Les plus utilisés en simulation comprennent : le test en χ^2 de Pearson, le test t de Student, le test F de Fisher et le test de Kolmogorov-Smirnov. Leur application est simple et facilitée par des tables. Un exemple de test en χ^2 , présenté en annexe 4.5, donnera la marche générale à suivre pour chacun d'eux.

Ces tests n'autorisent pas à conclure qu'il y a identité, ou non, entre les résultats simulés et réels, dans une comparaison statistique des résultats et des faits correspondants. Ils permettent simplement d'accepter, ou de refuser, une hypothèse donc de penser que rien ne contredit l'hypothèse d'identité des populations.

Dans le test en χ^2 , χ^2 mesure l'écart qui sépare les populations théoriques et réelles. La distribution des valeurs de χ^2 est indépendante de la loi théorique considérée et son expression ne dépend que d'un paramètre, le degré de liberté v . Toutefois ce test est entaché d'erreur, quand il s'applique à de petits échantillons. Le test t de Student est utilisé pour les moyennes de petits échantillons extraits d'une population gaussienne, et le test F de Fisher, pour les écarts types des échantillons extraits de cette même population. Le test de Kolmogorov-Smirnov, applicable initialement aux lois continues, a été étendu aux lois discontinues. Il est encore plus général que le test en χ^2 , car il reste valable

pour les petits échantillons. En outre, il est plus global car il compare la fonction de répartition observée de l'échantillon, avec la fonction de répartition théorique, tandis que le test de χ^2 compare deux distributions de fréquences: celles des observations rangées en classes, et celles des probabilités théoriques correspondant à ces mêmes classes.

C'est ainsi que l'on apprécie si la population tout entière d'une simulation, sur laquelle on a fait une hypothèse générale, est compatible avec une sous-population constituée par l'ensemble des données expérimentales.

CONCLUSION

Toute simulation repose essentiellement sur :

- les hypothèses
- les lois statistiques
- les données

Si elles sont bonnes et si elles se maintiennent bonnes, la simulation atteint son but. Si les conditions ou les données changent, elle n'est plus valable.

De toute façon, il convient de se rappeler que les résultats d'une simulation resteront toujours liés à la conception du modèle, à son contenu et aux intentions de son auteur.

4.6 CHAMP D'APPLICATION DE LA SIMULATION SUR ORDINATEURS

Depuis quinze ans, la simulation a progressé au même rythme que les ordinateurs, dans les trois domaines des simulateurs, des jeux et de la simulation des systèmes.

A - LES SIMULATEURS

Non seulement les navigants, mais les contrôleurs du trafic aérien et les opérateurs radars sont, eux aussi, formés et testés sur simulateurs. La Royal Air Force a mis au point, dans son école de formation des contrôleurs à Shawbury, un simulateur très étudié qui fait intervenir, en particulier, les échos permanents et les systèmes nuageux sur les écrans radars, ainsi que les effets variables du vent sur les signaux radars.

Le contrôle du trafic aérien futur de l'Europe Occidentale est simulé au Centre d'Essais de Brétigny, par une équipe internationale de 80 personnes. Un ordinateur TR4 calcule les positions de 60 à 300 avions, évoluant à Mach 2 et 3 dans un rayon de 1200 km, compute les routes suivies par chacun d'eux, compte tenu des plans de vol, des manoeuvres, des performances, des conditions météorologiques, des aides à la navigation etc... et simule les performances de 6 radars principaux et de leurs satellites, placés à la demande dans la zone de contrôle. Les contrôleurs s'exercent progressivement à la surveillance d'une quinzaine d'avions chacun. Ainsi sont étudiés à l'avance les nouveaux systèmes, les équipements, les méthodes, les techniques et les procédures.

Pour les pilotes de l'espace, les simulateurs constituent les seuls moyens d'entraînement. Au Centre de la NASA près de Houston au Texas, la simulation est reine. Sont simulés, au bénéfice des équipages et de l'équipement, les accélérations en vol dans des centrifugeurs rapides, et dans de grandes chambres à vide: les basses pressions, les températures extrêmes, les conditions d'éclairage etc... Les cosmonautes s'entraînent à marcher dans l'espace, dans d'immenses cuves à eau. La surface lunaire, sur laquelle on projette de faire poser le véhicule spatial habité, est simulé sur

quelques hectares de terrain. Les rendez-vous dans l'espace se font, dans des hangars, sur maquettes en vraie grandeur. Chaque pilote est tenu d'effectuer 180 heures d'entraînement, avant son premier vol spatial, sur un simulateur électronique, qui à lui seul, a coûté plus de 100 millions de francs.

Mais l'appareil le plus perfectionné est le simulateur conçu pour la mission "Apollo", au Cap Kennedy. Il se compose de 3 ordinateurs numériques du type DPP-224, équipés de mémoires importantes. Le programme du voyage lunaire comprend 4 fois plus d'instructions que celui d'une mission sur simulateur de vol en avion. Les instructeurs ont la possibilité d'introduire un millier d'incidents divers, pour étudier et corriger les réactions de l'équipage et des contrôleurs au sol. Les pilotes peuvent même voir à travers leurs hublots, des images de la terre, de la lune et du ciel, à différentes distances et sous des angles variés, comme dans la réalité. L'entraînement dure trois mois ; la répétition générale s'étale sur les 20 derniers jours : les cosmonautes sont contrôlés au Cap Kennedy, par le Centre de Houston. Les contrôleurs peuvent observer sur des écrans de télévision, leurs pilotes en route vers la lune, sur simulateur, comme ils le feront dans la réalité. Cet exemple, d'une part, montre la somme de connaissances qu'apporte la simulation d'un système inconnu et d'autre part, laisse présager tout le bénéfice qu'on pourra retirer de cette technique, quand elle sera appliquée aux jeux et à l'étude des systèmes économiques et sociaux, avec autant de conviction et de moyens.

Les simulateurs présentent un intérêt, non seulement pour entraîner les équipages ou les conducteurs de véhicules terrestres, mais aussi pour l'étude des matériels nouveaux. Les simulateurs d'étude permettent, en effet, de réaliser, en très peu de temps, sans aucun risque, et en faisant varier constamment les paramètres importants, un très grand nombre d'essais fictifs. L'industrie aéronautique a été une des premières à les employer, en particulier pour la mise au point des pilotes automatiques, pour l'étude des qualités de

vol des avions, des hélicoptères et des engins, pour les problèmes de tir, pour les essais des appareils d'atterrissage automatique et sans visibilité etc... Ces simulateurs d'étude sont utilisés, dès l'avant-projet, avec un modèle théorique, et pendant la période d'essais, en introduisant au fur et à mesure les éléments réels pour corriger le modèle théorique. La mise au point d'un pilote automatique peut nécessiter près de 4000 essais sur simulateur. Toute l'industrie moderne use de simulateurs d'étude. Elle emploie, à cet effet, des ordinateurs soit numériques, remarquables par leur précision, soit analogiques, mieux adaptés au fonctionnement en temps réel, soit enfin hybrides tendant à réunir les avantages des deux premiers.

B - LES JEUX OPERATIONNELS

Les jeux opérationnels connaissent un essor considérable, depuis la mise en service des ordinateurs. Ils comprennent à présent les jeux militaires, les jeux d'entreprise et les jeux politiques. Les premiers étaient pratiqués dans les écoles de guerre depuis fort longtemps, avec l'utilisation de cartes quadrillées, des boîtes à sable, des abaquages, des règles à calculer etc... A présent, les calculateurs électroniques modernes les ont rendus plus vivants, plus proches de la réalité et leur ont donné une ampleur inconnue jusqu'alors. Les jeux d'entreprise et politiques, pratiqués autrefois sur une très petite échelle, se sont développés avec les ordinateurs. Ils connaissent aujourd'hui une vogue universelle.

Le rôle des ordinateurs dans les jeux est essentiel. Une seule équipe se confronte avec un modèle de simulation, dans les jeux du mécanisme de la décision. Ainsi s'entraînent et maintiennent leur niveau opérationnel, les Chefs de Centre de la Défense aérienne, les contrôleurs du trafic aérien, les logisticiens etc... De même encore, les chefs d'entreprise s'exercent à gérer la production et les stocks d'une usine de peinture, dans le jeu monté par IBM et intitulé "The Production Manpower Decision Game". D'autre part, dans les jeux de combat, de concurrence et de politique, de nombreux facteurs et bon nombre de variables aléatoires peuvent intervenir grâce aux ordinateurs. Ceux-ci sont programmés de façon à tirer les

conséquences des décisions prises par les différentes équipes de joueurs.

Aux trois salles classiques des jeux d'écoles de guerre - celles du parti bleu, du parti rouge et de l'arbitrage - est venu s'ajouter le centre de calcul et de transmissions.

JEUX MILITAIRES

Les jeux militaires de combat se divisent en jeux tactiques et stratégiques. Les premiers sont menés dans les Ecoles de Guerre, les seconds dans les Instituts de Hautes Etudes de Défense Nationale. Batailles navales, combats terrestres à différents échelons et avec divers types d'armes, pénétrations et combats aériens, combats interarmées, avec ou sans armes nucléaires, composent les jeux tactiques. Le simulateur de combats de l'Ecole de Guerre Navale américaine occupe 3 étages et 650 m² de surface au sol.

Les jeux stratégiques concernent les systèmes offensifs, défensifs ou de soutien, à grande échelle, et les jeux politico-militaires. La défense aérienne de l'Amérique du Nord avec ses 150 radars a été organisée sous forme de jeu, par la Compagnie : "System Development Corporation" de Californie. Celle-ci a également simulé, avec de nombreux participants humains, le système de commandement et de contrôle du Commandement Aérien Stratégique américain, tandis que la Rand Corporation, de son côté mettait au point le modèle du système de soutien logistique mondial de l'Armée de l'Air. L'Armée de Terre et la Marine américaines se sont adressées de préférence aux Universités, pour construire leurs propres jeux.

À l'échelon du Commandant en Chef, il existe aux U.S.A. une Agence des Jeux Interarmées, où se joignent aux militaires, de hauts fonctionnaires de la Maison Blanche, des Ministères de la Défense et des Affaires Etrangères ainsi que des Services, pour jouer des exercices de guerre froide, d'escalade, de périodes de crise etc... Ainsi sont vérifiés, les systèmes de commandement et de contrôle, de télécommunications et de renseignements. Ces jeux, préparés en commun, n'ont pas pour but de chercher à connaître l'avenir, mais simplement d'aider à analyser la valeur des objectifs nationaux, des plans d'opérations, des programmes, des organisations et

de la coordination. Cuba, Berlin, l'URSS, la Chine, le Vietnam, entre autres, ont été joués et rejoués sous de nombreux angles, avec l'aide des plus puissants ordinateurs.

La valeur pratique des jeux militaires, tactiques ou stratégiques, est appréciée depuis longtemps, mais leur échelle actuelle leur donne un regain d'intérêt. Les officiers acquièrent l'expérience théorique des commandements et des organisations opérationnelles et logistiques, mettent à l'épreuve les plans de manoeuvres et de guerre, s'initient au combat des autres armées, apprennent à peser l'influence des facteurs politiques, économiques, industriels, sociaux, nationaux, sur le déclenchement et le déroulement des opérations de guerre, analysent les conséquences de l'utilisation des armes nucléaires, se forment au travail en équipe

Cette formule moderne de jeux coûte beaucoup de temps et d'argent : aussi n'a-t-elle pas encore franchi la porte des Ecoles de Guerre françaises.

JEUX D'ENTREPRISE

La ferveur des Américains pour les jeux opérationnels a gagné aussi les Universités et l'Industrie, avec les jeux d'entreprise et les jeux politiques, qui sont beaucoup plus vivants et instructifs que les anciennes études de cas.

L'American Management Association a réalisé en 1955 le premier jeu d'entreprise, destiné au perfectionnement des cadres supérieurs. Les sessions duraient une semaine ; des centaines de chefs d'entreprises ont participé à ce jeu. Initialement, les calculs se faisaient à la main. On s'est vite aperçu qu'un calculateur électronique était devenu indispensable.

L'Université de Californie à Los Angelès monta alors un jeu beaucoup plus vaste et complet que le précédent. De leur côté, les constructeurs d'ordinateurs, en particulier IBM, Burroughs et General Electric, en créaient pour montrer l'intérêt de l'emploi des calculateurs. Les compagnies privées de gestion : Booz, Allen, Hamilton ainsi que les trois "grandes" : Westinghouse, Boeing, Pillsbury Mills, furent aussi parmi les premières à construire des jeux dans le but d'éclairer la Direction des entreprises, au moment de la prise de décision.

Le départ était donné. Les Universités renommées telles que MIT, Harvard, Princeton, Stanford, Carnegie Institute of Technology, Case Institute of Technology, etc... développèrent leurs jeux, à la fois pour la formation des étudiants et pour la recherche. Actuellement, toutes les universités américaines utilisent des jeux d'entreprise dans leurs Ecoles Supérieures de Commerce, pendant la durée de l'année scolaire, à la cadence d'une période par semaine en général. Les étudiants organisés par équipe et spécialisés dans un rôle, rédigent leurs rapports de gestion et présentent les résultats obtenus, qui sont discutés ensuite avec leurs professeurs. Les jeux sont, le plus souvent, orientés vers des politiques à moyen et à long terme. Sont ainsi étudiés : les marchés, les ventes, la gestion du personnel, des machines et des stocks, la production, son échelonnement, les achats, la fabrication, le financement, les prix, les aspects financiers et comptables, les réseaux de distribution, les chaînes de marché, la clientèle, le développement des entreprises, les investissements, la compétition, la publicité, les règles de l'approvisionnement, les stockages, le soutien logistique, les transports etc...

Les premiers jeux français ont été présentés, il y a une dizaine d'années, par la Compagnie Française d'Organisation et la Compagnie d'Ingénieurs en Organisation. Puis IBM a sorti la version française du jeu américain, tandis que Bull organisait des sessions en France et en Europe, au profit des dirigeants de sociétés, avec son modèle dynamique de gestion d'entreprise, grâce auquel diverses politiques de vente et de gestion industrielle étaient simulées.

L'organisation du "jeu Bull" est classique. Une brochure explique la situation, fournit les statistiques, donne l'inventaire de l'équipement et décrit l'organisation commerciale. Chacune des équipes représente une des sociétés du modèle et travaille isolément. Elle fournit, à chaque session, la feuille de décisions qui énumère, chapitre par chapitre, les décisions à prendre. Celles-ci, une fois prises, sont perforées sur cartes et introduites dans le calculateur, qui détermine les résultats obtenus d'après le modèle

et imprime la feuille des résultats. Cette dernière comporte les résultats propres à l'équipe, corrigés éventuellement par l'effet de diverses données aléatoires, les informations nécessaires sur les concurrents et, de temps en temps, les bilans des adversaires. La comparaison de cette nouvelle situation avec la précédente conduit chaque équipe à préparer de nouvelles décisions pour la période suivante, de façon à maintenir la gestion dans la ligne moyenne fixée initialement. Le modèle comporte 78 décisions et fournit 187 informations. Les équipes rédigent aussi, à chaque période, un rapport de gestion, conçu sous forme de réponses à un questionnaire. Ces rapports permettent au directeur de jeu, au cours de la séance finale de critique, d'exposer et de comparer les différents résultats obtenus par les équipes, et au chef d'équipe de justifier les décisions prises. L'arbitre de jeu vérifie si ces dernières respectent les règles extérieures au modèle. De lui dépendent : le taux des découverts en banque, les taux d'intérêts, l'évolution des marchés des matières premières, l'expansion ou la récession dans chaque secteur de vente.

On voit que la France a reconnu, dès le départ, l'intérêt de la méthode des jeux d'entreprise et ses possibilités d'application pratique.

Il nous semble à présent, que de tels jeux s'orientent plutôt vers la formation des étudiants, des cadres de gestion et vers la recherche, que vers le perfectionnement des cadres de direction des entreprises, compte tenu des progrès de la simulation des systèmes et de la tendance à posséder le modèle dynamique de sa propre affaire. Autrement dit, les jeux d'enseignement et la recherche paraissent prendre le pas sur les jeux d'entraînement des directeurs.

Les principales critiques formulées à l'égard des jeux d'entreprise visent leur caractère séquentiel, alors que les décisions réelles sont prises d'une façon aléatoire : en effet, un directeur d'usine n'attend pas la fin d'une période pour agir. Ces critiques portent aussi, sur la simplicité des modèles, l'absence

de représentation des relations sociales, et la crainte de voir les modèles se substituer aux responsables ou les suggestionner, ou les intoxiquer. Il est exact que les jeux conserveront toujours un caractère artificiel, bien que le nombre des facteurs qui interviennent dans les modèles aille sans cesse croissant, à cause des ordinateurs.

Enfin, un chef mieux éclairé sur les conséquences des décisions qu'il a la possibilité de prendre, devra toujours faire preuve de personnalité au moment du choix, car, en définitive, la simulation n'est qu'une aide. Elle conduit rarement, il faut le reconnaître, à la solution optima qui faciliterait au mieux la décision du chef.

JEUX POLITIQUES

Dans les jeux politiques, comme dans les jeux d'entreprise, il s'agit essentiellement, d'une part, de simuler l'environnement pour introduire, par rétroaction, les conséquences des décisions prises par les équipes, et, d'autre part, de montrer l'action réciproque du milieu et des joueurs. Les jeux politico-militaires font déjà partie des jeux politiques, quand la dominante est politique.

L'Université américaine "Northwestern" a été une des premières à composer, vers 1959, un modèle sur ordinateur pour l'étude expérimentale des systèmes politiques internationaux. Cinq nations sont simulées dans ce jeu, construit pour la formation des étudiants en sciences politiques et dans un but de recherche. Le Gouvernement de chaque nation est représenté par une équipe d'étudiants. Celle-ci, informée des ressources du pays, est chargée d'atteindre, au mieux, les objectifs nationaux intéressant la sécurité, les alliances et le développement interne, dans la conjoncture internationale et compte tenu des initiatives des autres nations.

L'organisation des jeux politiques est semblable à celle des jeux d'entreprise, et le rôle de l'ordinateur identique. Le succès de ce premier modèle a encouragé les Universités possédant un Institut de Sciences Politiques, à monter d'autres jeux. C'est ainsi que sont analysées : les situations les plus diverses, en périodes normale ou de tension, le jeu des alliances, les crises politiques, les offensives économiques, le renseignement sous toutes ses formes, les famines, la propagande, la subversion, le rôle des syndicats, les conséquences d'une réussite technologique importante, l'escalade, le temps de guerre, les réactions des différents pays en face d'un événement, les décisions des organismes internationaux, les discours politiques, les luttes raciales, les grèves etc...

Les jeux opérationnels renseignent sur l'aspect global des systèmes, l'influence des paramètres et des variables, l'action réciproque de l'environnement et du système, le fonctionnement de la rétroaction. Ils apprennent aux joueurs la manipulation des modèles et le mécanisme de la décision, en les habituant à chercher différentes solutions, à les peser, à les comparer et à choisir celle qui semble atteindre le but fixé, dans les meilleures conditions. Par ailleurs, ils font découvrir toutes les implications d'une décision ou d'un ordre, et constater les relations de cause à effet. Ils mettent en évidence la nécessité de posséder un système d'information efficace. Enfin ils familiarisent les joueurs avec les systèmes d'ordinateurs et leurs énormes possibilités.

Il convient toutefois de se rappeler que les jeux ne sont que des aides, qu'ils ne donnent ni le sens des affaires, ni le jugement, ni le courage à ceux qui en sont dépourvus, qu'ils conservent malgré tout un caractère artificiel, que leurs modèles simplifient la réalité, que le comportement d'un joueur dans un environnement fictif n'est pas garant de son attitude dans le monde réel. Enfin, leur coût est élevé.

C - CHAMP D'APPLICATION DE LA SIMULATION DES SYSTEMES

ETENDUE

La simulation des systèmes couvre, à l'heure actuelle, tous les secteurs d'activité. Elle s'applique à un large éventail de situations, exigeant des décisions à court comme à long terme.

Dans le domaine de la gestion par exemple, les choix à court terme intéressent le fonctionnement de l'affaire : tels sont les dates de livraisons, l'alimentation d'une machine, le client à contacter, les ouvriers supplémentaires à embaucher etc... Mais la simulation est aussi l'outil des décisions à long terme d'une bonne planification, coiffant aussi bien l'implantation de nouveaux dépôts, l'achat de machines-outils supplémentaires, les changements d'organisation ou de plans, que les modifications (cadence de travail, méthodes de fabrication, ou règles de fonctionnement).

La simulation aide à prendre les décisions qui se traduisent par le choix d'un facteur numérique, comme un volume de matériel à acheter, et, celles qui n'en comportent pas, comme l'établissement d'une procédure ou d'une règle opérationnelle. Le coût de la simulation est couvert, soit par l'amélioration du fonctionnement et des plans, soit par l'abandon de projets non rentables.

Les systèmes sont simulés *couramment et avec succès* dans l'Industrie, l'Economie et les Affaires, dans les Forces Armées et dans les Laboratoires ; *en avant-garde et avec difficulté* dans les Sciences Psychologiques, Sociales, Politiques, Humaines en général.

IBM a publié une notice bibliographique sur la simulation totalisant 948 ouvrages, études ou articles, parus dans le monde, la plupart entre 1960 et 1965. Le dépouillement détaillé de cette liste révèle que 38% des applications intéressent l'économie au sens large, 20% l'industrie, 9% l'enseignement, 7% les jeux, 4% les expériences de laboratoire, 8% les sciences humaines et 14% les Forces Armées. Ce dernier pourcentage ne reflète pas exactement l'effort militaire, car la plupart des applications sont couvertes par le secret.

GESTION

Les modèles de simulation intéressant la gestion sont d'un usage courant aussi bien dans l'Economie, les Affaires, que dans l'Industrie ou les Forces Armées. Ils ont l'avantage d'être connus et mis au point, d'être journellement utilisés en simulation comme en application et d'être présentés dans une abondante documentation. Ils sont suffisamment généraux pour s'adapter à de très nombreux cas particuliers. Ils ont cet autre avantage d'avoir été étudiés par les programmeurs et les analystes au cours de leur formation, et enfin d'être prévus dans la construction des langages de simulation. Ce sont les modèles de file d'attente, de production, de stockage, de distribution, d'inventaire, d'ordonnancement, de paiement....

SYSTEMES TACTIQUES

Ces modèles de gestion simulent, en réalité, des sous-systèmes. Mais la simulation concerne aussi les systèmes dans leur ensemble, qui selon leur complexité, leur ampleur et le degré d'intervention de l'homme, peuvent être classés d'une façon assez large, en tactiques et stratégiques.

Pour les premiers, l'éventail des applications est extrêmement étendu. Les systèmes de transport par air, routes, mer, rivières et voies ferrées, sont abondamment simulés. Cela tient d'une part, à la complexité croissante des zones de contrôle d'aéroports, des ports, des gares, des autogares, des entrées et sorties d'autoroutes, d'autre part, aux dangers qu'apporte le développement rapide des moyens, dans un système qui le plus souvent suit ce développement au lieu de le prévoir. Sont ainsi simulés : les systèmes de navigation aérienne et maritime tous temps ; les systèmes d'atterrissage sans visibilité dont il s'agit d'établir les normes, en fonction de l'équipement et des conditions météorologiques ; les systèmes d'autoroutes, de feux de signalisation, de transport de passagers et de frêt ; les systèmes combinés qui font intervenir plusieurs moyens et sont liés à d'autres concernant le stockage et la distribution.

Les systèmes de télécommunications se prêtent bien aussi à la simulation, d'autant plus qu'aujourd'hui, les ordinateurs font partie intégrante du système. C'est une méthode sûre pour améliorer un trafic téléphonique inadapté. Les systèmes météorologiques sont simulés à différentes latitudes et à plusieurs niveaux, pour la prédiction du temps à moyenne et longue échéance. Les activités logistiques le sont aussi abondamment, qu'il s'agisse de systèmes de dépôts, de stockage, de ravitaillement, de pièces de rechange critiques, d'inventaires, d'entretiens périodiques systématiques ou à la demande.

Dans l'industrie, la simulation intervient de même pour les problèmes d'ordonnancement intéressant aussi bien la priorité et l'agencement des tâches sur des machines, que la suite logique des activités dans les constructions ou montages. L'industrie pétrolière, et d'une façon générale, les productrices d'énergie, utilisent à grande échelle cette technique.

La Tennesse Valley Authority aux USA et l'EDF en France, par exemple, ont conçu un modèle de simulation très élaboré pour déterminer périodiquement le plan de charge des différentes stations, et produire ainsi le kilowatt au plus bas prix. Ce modèle est composé de sous-modèles hydrauliques et hydroélectriques.

L'industrie métallurgique est riche, elle aussi, en modèles, particulièrement en Grande-Bretagne où ses meilleurs spécialistes travaillent dans cette branche. Les modèles analogiques semblent mieux convenir à l'industrie électronique qui les utilise en permanence. Les banques, les hôpitaux, les ordinateurs eux-mêmes sont simulés.

Dans les sciences sociales, les modèles démographiques sont mis au point et réajustés périodiquement. De même dans les sciences politiques, où les modèles d'élection s'améliorent et les modèles de systèmes politiques commencent à apparaître. Les psychologues ont déjà tenté de simuler la personnalité. Dans l'ensemble des sciences humaines, la validité d'un modèle de simulation dépend principalement de deux conditions. L'échantillonnage doit d'abord représenter au plus près la population, car la moindre erreur peut changer le résultat, quand les marges sont faibles. D'autre part, et surtout, il n'existe pas encore de mesures directes, et même indirectes,

valables et stables de la plupart des qualités, des émotions, des réactions humaines, individuelles ou collectives. Mais dès l'instant que la méthode est appliquée, et que les recherches se poursuivent, les modèles se perfectionnent. Les économistes connaissent les mêmes difficultés quand ils tentent de simuler un marché, la publicité, les goûts de la clientèle. Si les oeuvres de l'homme se prêtent bien à la simulation, par contre l'homme dans sa complexité évolutive y échappe en partie.

Les Forces Armées font un usage intensif de la simulation tactique. Les modèles de gestion du personnel et du matériel y sont courants ainsi que les simulations de combats tactiques (interceptions aériennes, trajectoires d'engins, combats de tanks, d'unités mécanisées, de formations navales, de sous-marins, de groupements interarmées...). Sont manipulés dans les Etat-Majors opérationnels des modèles d'évacuations sanitaires, de défense civile, de pertes à la suite d'attaques nucléaires, de défense aérienne, de conservation des points sensibles avec estimation des engins et armes nécessaires à leur défense, de vulnérabilité des armes, de transport de personnel et de ravitaillement etc... Enfin, les responsables à tous les échelons se penchent sur les résultats des programmes d'ordinateurs connus sous le nom de "coût-efficacité".

L'annexe 4.6 donne un aperçu des modèles de simulation, économiques et militaires, construits en France.

SYSTEMES STRATEGIQUES

Les chefs militaires responsables recourent largement aux simulations stratégiques, avant d'élaborer l'idée de manoeuvre d'un plan d'opérations, ou pour la modifier après une étude approfondie des facteurs : ennemi, ami, moyens et cadre d'action. Ces simulations ont l'ampleur des Grands Commandements, qu'ils soient Stratégique, de Systèmes d'Armes, de Défense Aérienne, de Transport, Logistique, Tactique, ou des combinaisons de plusieurs d'entre eux. Elles coiffent aussi les systèmes de Commandement et de Contrôle, à l'échelle des pays d'une coalition, d'un continent, ou du globe

tout entier, sans négliger les facteurs politiques, économiques, industriels, sociaux et moraux.

On a coutume de ranger parmi les simulations stratégiques les modèles économiques et industriels de grande envergure et représentant des systèmes globaux. Beaucoup d'entre - eux émanent des Universités. Les uns sont des modèles généraux, orientés vers la recherche et conçus pour l'analyse des comportements des entreprises ou l'étude de l'économie. Les autres, des modèles appliqués intéressant un pays, un groupe de pays, ou une vaste entreprise. Parmi les modèles généraux et globaux les plus connus, figurent ceux des professeurs Bonini et Forrester, de la Compagnie "SDC" (Systems Development Corporation), de Stanford Optner, de Arnold Reisman & Elwood Buffa, de Kong Chu & Thomas Naylor. Les modèles stratégiques appliqués les plus avancés, sont ceux qui concernent les pays sous-développés, pour la simple raison qu'ils sont les plus aisés à construire.

Bonini analyse surtout les relations à l'intérieur de l'entreprise. Son modèle est exposé dans "La Théorie du Comportement de l'Entreprise". Il comprend trois sous-systèmes : le Conseil d'Administration, réglant, entre autres, budgets et prix, la Production et la Vente ; il est affecté, en outre, par deux systèmes : ceux de l'information, avec ses centres et ses chaînes, et de la décision avec, lui aussi, ses centres et ses règles. Il fait intervenir le comportement des individus à l'aide d'une caractéristique originale : l'indice de pression ressentie, dont la grandeur est fonction de la différence entre le but et la réalisation. Ce modèle ne peut s'appliquer qu'à une entreprise en régime de croisière, avec des marchés soit en expansion, soit en régression. Il ne tient compte, sur le plan psychologique, que des effets, sans remonter aux motivations des individus. Néanmoins, il a le mérite d'exprimer par des relations mathématiques, l'environnement extérieur constitué avant tout par l'état du marché, et l'environnement intérieur que traduit l'indice de pression.

Le comportement dynamique du système de J. Forrester est simulé à partir de modèles, dont la structure comprend: les niveaux, les flux, les fonctions-décisions et les canaux d'information. Les niveaux sont les réservoirs du système tels que le nombre d'ouvriers, les inventaires, les comptes bancaires etc... Les flux ou réseaux relient les niveaux et débitent l'activité instantanée. Ils concernent le personnel, les matières premières, le capital, l'équipement, les ordres, l'argent, et l'information. Les fonctions-décisions règlent le débit des flux. Les canaux d'information proviennent des niveaux, aboutissent aux fonctions de décision qui actionnent les vannes régulatrices du flux. La manipulation du modèle permet de figurer les états successifs du système, en faisant varier les équations de niveaux et de débits. Si la demande s'accroît de 10%, quelle est la réponse du modèle ? Les mécanismes d'amplification et de régulation par rétroaction, formules originales, prennent en charge les changements de situations ainsi que les réactions humaines, que le Professeur Forrester suppose toujours normales et régies par l'habitude.

Ces deux exemples montrent l'intérêt des modèles globaux, mais aussi leurs difficultés. Modèles de laboratoire, ils aident à comprendre les mécanismes de l'information et de la décision, ainsi que la structure des firmes.

Les modèles globaux individuels d'entreprise commencent à voir le jour. Mc Millan et Gonzales de l'Université de Michigan ont simulé, en langage Fortran, la Compagnie "Simco", pour la vente d'un purificateur d'air électronique. Ce modèle, qui se compose de 5 sous-programmes et du programme principal, est relativement simple, à l'image de l'entreprise. Dans ce domaine, c'est en débutant à petite échelle que l'on progresse rapidement.

Le champ d'application de la simulation est donc déjà très étendu et on peut prévoir que son extension ira de pair avec l'accroissement des ordinateurs, aussi bien en nombre qu'en puissance.

4.7 CONCLUSION

La simulation des sous-systèmes est aujourd'hui couramment pratiquée : elle fournit des résultats exploitables. Celle des systèmes globaux en est à ses débuts, mais ne progresse que lentement, car les sous-systèmes composants ne se prêtent pas tous avec la même facilité à la simulation, et les relations entre les sous-systèmes ne sont pas toutes connues. La méthode n'est pas en jeu : elle est suffisamment générale et souple pour s'adapter à tous types de sous-systèmes et de systèmes.

L'expérience aidant, les techniques se développent et se simplifient. Les langages tendent vers un regroupement, tout en facilitant encore davantage la construction du modèle et sa programmation. L'éventail de la simulation s'élargit au point de couvrir tous les secteurs d'activité.

Industriels, hommes d'affaires, directeurs, administrateurs, entrevoient déjà le parti considérable qu'ils pourraient retirer d'un modèle, bien pensé et constamment réajusté, de leur propre entreprise. La recherche dans cette voie est, à coup sûr, source de profit et d'immense satisfaction.

V . - CONCLUSION GENERALE

La présente étude sur la simulation des systèmes fournit le cadre indispensable au développement et à la compréhension d'applications. La construction repose sur un système. Le système, dans le monde moderne, est caractérisé par son aspect global, par sa vie dans un environnement dynamique et par la nécessité de son adaptation continue, grâce aux puissants mécanismes de contrôle et de rétroaction. C'est pourquoi les buts poursuivis par le système sont à trouver ou à définir, et à ajuster. Cet ajustement suppose la connaissance des éléments constitutifs du système et de leurs lois propres, ainsi que la découverte des relations qui font des composants un tout. Cette recherche des lois et des relations n'est pas facile : elle impose la création de modèles.

Les modèles sont des représentations abstraites et simplifiées des systèmes qui, dans leur complexité, ne peuvent être, d'emblée, analysés, compris, assimilés par l'esprit humain. Ils ne servent pas toujours à expliquer le système, mais permettent, pour le moins, de connaître certains aspects de son comportement, et parfois son comportement d'ensemble. Dès l'instant où le comportement du système est déterminé par le modèle, il devient possible de le prédire avec succès : c'est là l'essence même du modèle.

Mais par suite des hypothèses de simplification, les prédictions du modèle ne coïncident jamais exactement avec celles du système ; néanmoins un modèle bien construit donne une orientation raisonnable du comportement du système.

Aux modèles mathématiques sont venus s'ajouter, grâce aux ordinateurs, des modèles logiques ou de procédure qui suivent pas à pas le déroulement des opérations. Construire un modèle, avec l'intention de confier sa manipulation à un ordinateur, c'est déjà entrer dans le domaine de la simulation.

Un modèle de simulation est manipulé dans le but de présenter à la décision du chef ou de la direction d'une affaire, diverses solutions d'un problème. Il s'agit donc de faciliter le choix, au cours de la phase de décision. Celui-ci intervient dans les deux grandes applications de la simulation : l'analyse et la construction des systèmes. En effet, la prédiction des comportements d'un système et la comparaison de plusieurs modes de sa construction conduisent, dans les deux cas, à une option. C'est là que réside le principal avantage de la simulation : mettre à l'épreuve une idée ou un changement, en évaluant les avantages de plusieurs solutions, en pesant leurs risques et en évitant une expérimentation directe et coûteuse.

La simulation est une technique parmi d'autres. Elle n'est certes pas universelle ; elle a ses limites. On ne saurait tout en attendre. Sa puissance lui est conférée par les ordinateurs. Elle résoud et manipule des modèles mathématiques à une vitesse incomparable. Elle a, en propre, des modèles de procédure qui donnent la solution de problèmes insolubles, ou presque, par les mathématiques. Cette méthode s'avère pourtant onéreuse, car la construction du modèle, sa programmation sur ordinateur et l'analyse de résultats valables, demandent un travail minutieux qui relève de spécialistes, ainsi que des heures d'ordinateur dont le coût est encore très élevé. C'est également une méthode d'emploi délicat car : les solutions obtenues sont en effet rarement applicables, telles quelles, au monde réel.

Après avoir assimilé l'essence, les possibilités, les écueils et les limites d'une technique nouvelle, il convient, pour passer aux applications, de posséder une méthode de travail et un ensemble de procédés. La méthode est affaire de logique : celle qui vient d'être exposée a déjà conduit à des résultats. Les procédés ou techniques particulières sont nombreux. Nous avons présenté ceux qui nous apparaissent fondamentaux. Il reste qu'un ouvrage consacré à ce seul sujet, illustré d'exemples réels, présenté dans un langage mathématique abordable et pratique, donnant des recettes d'application simples, faciliterait grandement la construction des modèles de simulation ainsi que la vérification de la

validité des résultats. Des modèles ont été manipulés et réussis par milliers. Une telle collection, rangée par grandes familles, montrant pour chacun l'expression du modèle, l'organigramme et sa programmation, la possibilité d'utiliser des sous-programmes tout préparés et stockés en banque, permettrait de recueillir le bénéfice de l'immense effort fait dans ce domaine récemment, ainsi que les multiples astuces de ce monde plein de finesse. Dans l'application qui suit cette étude, nous nous efforçons d'expliquer en détail aussi bien le déroulement de la méthode que la façon d'utiliser les techniques de simulation. Si l'ensemble de ce travail pouvait être le point de départ d'un guide de la simulation des systèmes, le patient effort qu'il a demandé à son auteur trouverait sa récompense.

Le besoin de simulation nous semble évident. Si tous les systèmes de remplacement, en période de grève par exemple, avaient été simulés avant leur mise en place par tâtonnements, ils auraient rempli leurs missions plus rapidement et plus complètement. Il est exact que les mêmes conditions ne se renouvellent jamais, et qu'une étude préalable ne reflète pas exactement la situation de fait ; mais, d'une part, la manipulation d'un modèle permet d'étudier un grand nombre de situations ; d'autre part, il est toujours possible d'ajuster un modèle existant aux conditions présentes, et ensuite de le manipuler.

Nous sommes profondément convaincus que la simulation à petite échelle, telle notre application, qui est à la portée aussi bien des analystes que des experts en informatique, devrait proliférer dans les universités, l'industrie, l'économie, les affaires de notre pays.

Dès que les autorités, les responsables, les ingénieurs, commenceront à soupçonner le profit que l'on peut tirer d'une pareille technique, son développement sera rapide. Par ailleurs, ceux qui, dans le monde, ont bénéficié des études de simulation et apprécié à leur valeur les résultats obtenus, cherchent déjà à construire le modèle global de leur entreprise : ce dernier répondra aux changements de conditions ou de situations, il tirera les conséquences d'une idée nouvelle, d'un projet de transformation, d'une

modification envisagée. Bien vite aussi, on essaiera de bâtir le modèle de son concurrent.

Enfin, le perfectionnement des ordinateurs ainsi que la simplification des techniques et des langages, faciliteront à la fois la construction et la manipulation des modèles de simulation, mais au prix de patientes recherches et d'une longue pratique.

LOIS DE REPARTITION DE PROBABILITE

I - LOIS CONTINUES

Loi donnée	Exponentielle	Uniforme
Fonction de répartition	$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ si $x \geq 0$ $F(x) = 0$ si $x < 0$	$F(x) = \frac{x-a}{b-a}$ si $x \in [a, b]$ $F(x) = 0$ si $x < a$ $F(x) = 1$ si $x > b$
Fonction de densité	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ si $x \geq 0$ $f(x) = 0$ si $x < 0$	$f(x) = \frac{1}{b-a}$ si $x \in [a, b]$ $f(x) = 0$ si $x \notin [a, b]$
Limites de x	0, 1, 2, ∞	(a, b)
Espérance	$E(X) = \frac{1}{\lambda}$	$E(X) = \frac{b+a}{2}$
Variance	$V(X) = \frac{1}{\lambda^2}$	$V(X) = \frac{b^2 - a^2}{12}$ $a = E(X) - \sqrt{3V(X)}$ $b = E(X) + \sqrt{3V(X)}$
Variable X	$X = -\frac{1}{\lambda} \log R$ $= -E(X) \log R$	$X = a + (b-a) R$ $R \in [0, 1]$
Utilisation	- En général, liée au facteur temps - Intervalle de temps, entre les accidents, dans une usine - Arrivée des commandes dans une usine - Arrivée des malades dans un hôpital - Arrivée des avions sur un aéroport etc ...	- Utilisation fréquente en simulation - Création de variables aléatoires uniformes à partir de la plupart des lois de répartition - Pour augmenter la précision de mesures entre deux limites etc ...

- ANNEXE 4.4 -

ANALYSE ET POSSIBILITES DES LANGAGES DE SIMULATION

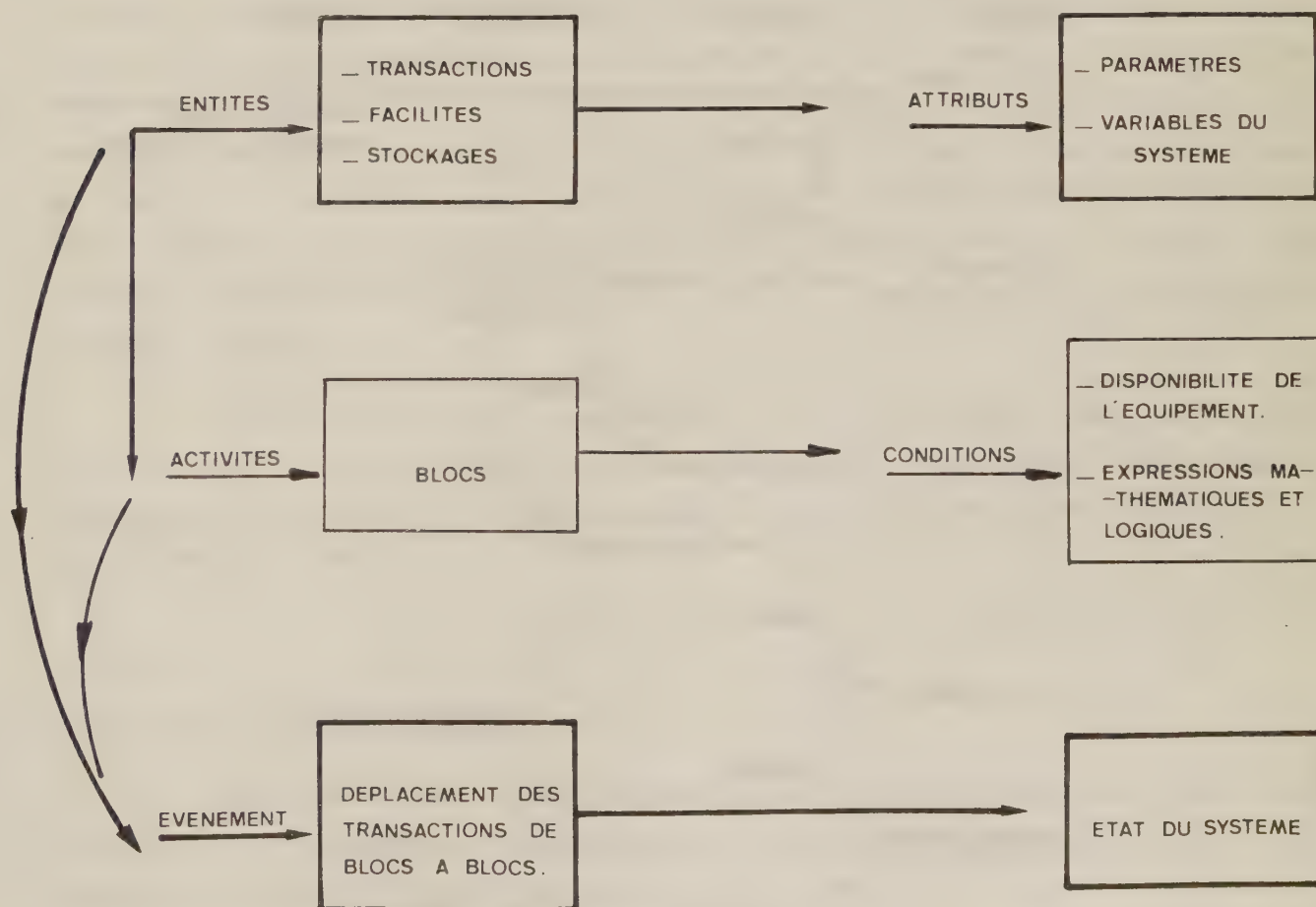
I. GPSS

I.1 DESCRIPTION

GORDON considère un système comme un ensemble d'entités, qualifiées par des attributs, agissant sur certaines activités, dans certaines conditions.

Le couple entité-activité représente un événement du système.

L'événement change l'état du système.

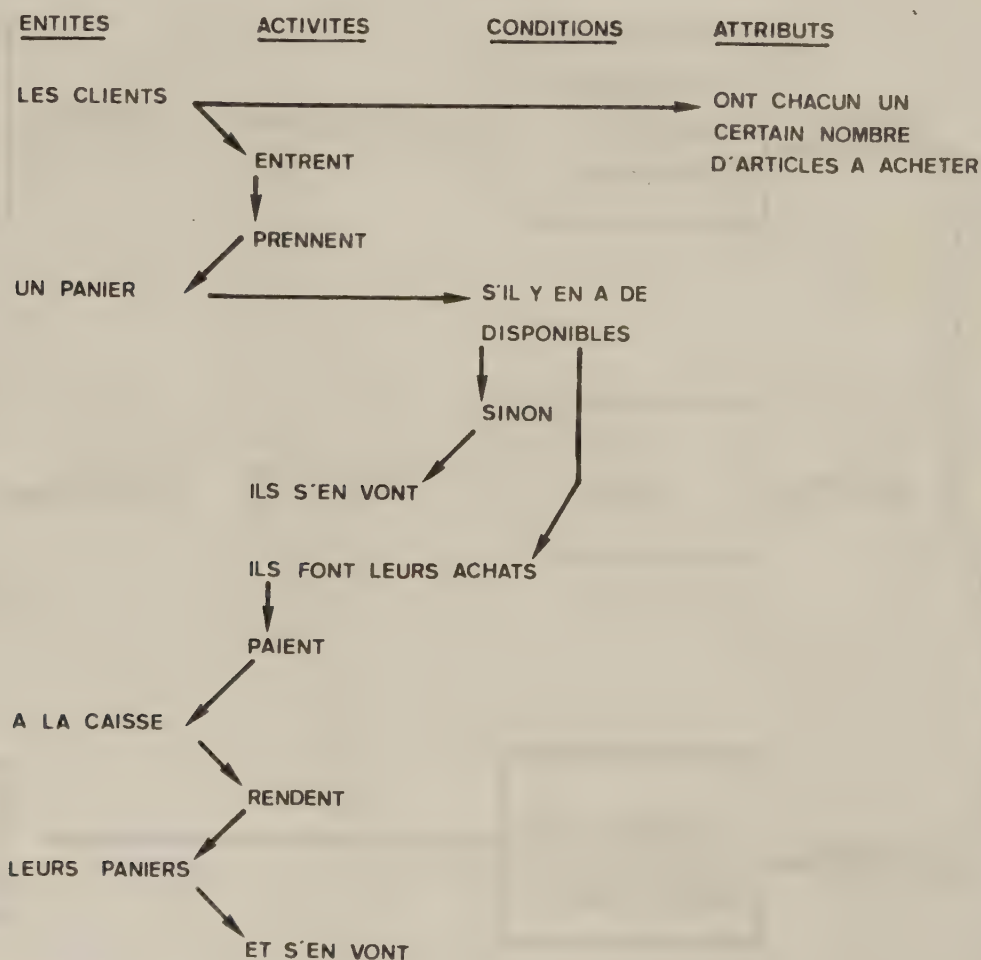


- TABLEAU 4.4A-1 - LES COMPOSANTS D'UN SYSTEME EN GPSS

L'exemple de la circulation des clients dans un grand magasin washingtonien, que nous avons étudié en utilisant un modèle de GORDON, nous aidera à comprendre l'essentiel du GPSS.

Cette étude avait pour but de vérifier, si les installations et l'équipement actuels s'avèreraient adéquats, quand serait achevée la construction d'un grand immeuble, situé à proximité du magasin. Notre travail consistait à chiffrer en fonction d'un nombre croissant de clients, les files d'attente devant chaque caisse, et à calculer, le pourcentage de paniers disponibles.

Les clients, en quête d'un certain nombre d'articles, entrent dans le magasin. Ils prennent un panier, s'il y en a de disponibles. Tableau 4.4A.2.



- TABLEAU 4.4A-2 - EXEMPLE GPSS

Sinon, ils en attendent un, ou bien s'en vont, faute de pouvoir attendre. Ils font leurs achats, paient à la caisse, rendent leurs paniers et sortent.

Les entités comprennent les transactions, les facilités et les stockages. (Tableau 4.4A.1). Les transactions se déplacent dans le système et passent d'un bloc à un autre. Elles peuvent être des hommes, des choses, des messages, des automobiles etc... Dans notre exemple, elles représentent les clients. En outre, les transactions utilisent des équipements qu'on appelle dans le GPSS : facilités et stockages. Une facilité, liée au facteur temps, ne peut être utilisée que par une transaction à la fois : par exemple, la caisse dans un magasin ; un stockage, lié au facteur espace, peut au contraire être employé par plusieurs transactions simultanément : ainsi les paniers d'approvisionnement. Facilités et stockages sont identifiés par des nombres.

Les attributs se composent des paramètres, tel le nombre d'articles à acheter dans un magasin, et des variables du système comme le temps simulé, la disponibilité d'une facilité, le contenu d'un stockage etc...

I.2 BLOCS ET ORGANIGRAMME

Les activités sont représentées par des blocs-types qui ont chacun un symbole, un nom et un chiffre. Dans chaque bloc, le temps de passage d'une transaction est calculé et noté.

Les blocs utilisés dans notre exemple sont les suivants :

ORIGINATE



Ce bloc crée des transactions à intervalles de temps conformes à une loi d'arrivées.

ADVANCE



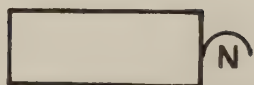
Ce bloc d'avancement du temps déplace les transactions après n unités de temps. Il n'est pas applicable à l'équipement mais uniquement aux activités qui demandent du temps. Il est utilisé aussi pour conserver une transaction en attente d'équipement.

TERMINATE



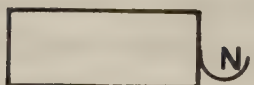
Ce bloc détruit la transaction qui y entre, après l'avoir comptée.

ENTER



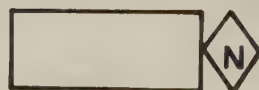
Stockage en N de la transaction.

LEAVE



Retrait de la transaction du stockage en N .

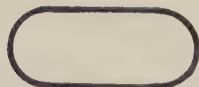
HOLD



Ce bloc est associé à la facilité $N^{\circ} N$. Il immobilise la facilité à l'entrée de la transaction, et la libère à la sortie. Le temps de séjour de la transaction est calculé.

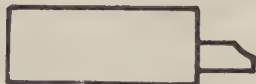
Ces trois derniers blocs intéressent l'équipement.

MARK



Ce bloc note le temps quand une transaction y entre.

TABULATE



Ce bloc note _ l'heure quand une transaction y entre,

_ l'intervalle de temps qui sépare l'entrée de la transaction dans MARK et celle dans TAB, c'est-à-dire le temps de transit de la transaction.

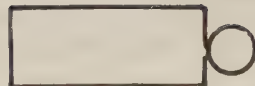
Ces deux derniers blocs sont associés.

QUEUE



Quand les conditions pour faire avancer une transaction ne sont pas satisfaites, cette dernière se met en attente devant le bloc. Ainsi une file d'attente se crée : sont calculées automatiquement la longueur moyenne et maximale de la file et, à la demande, la loi de répartition des attentes.

STORE



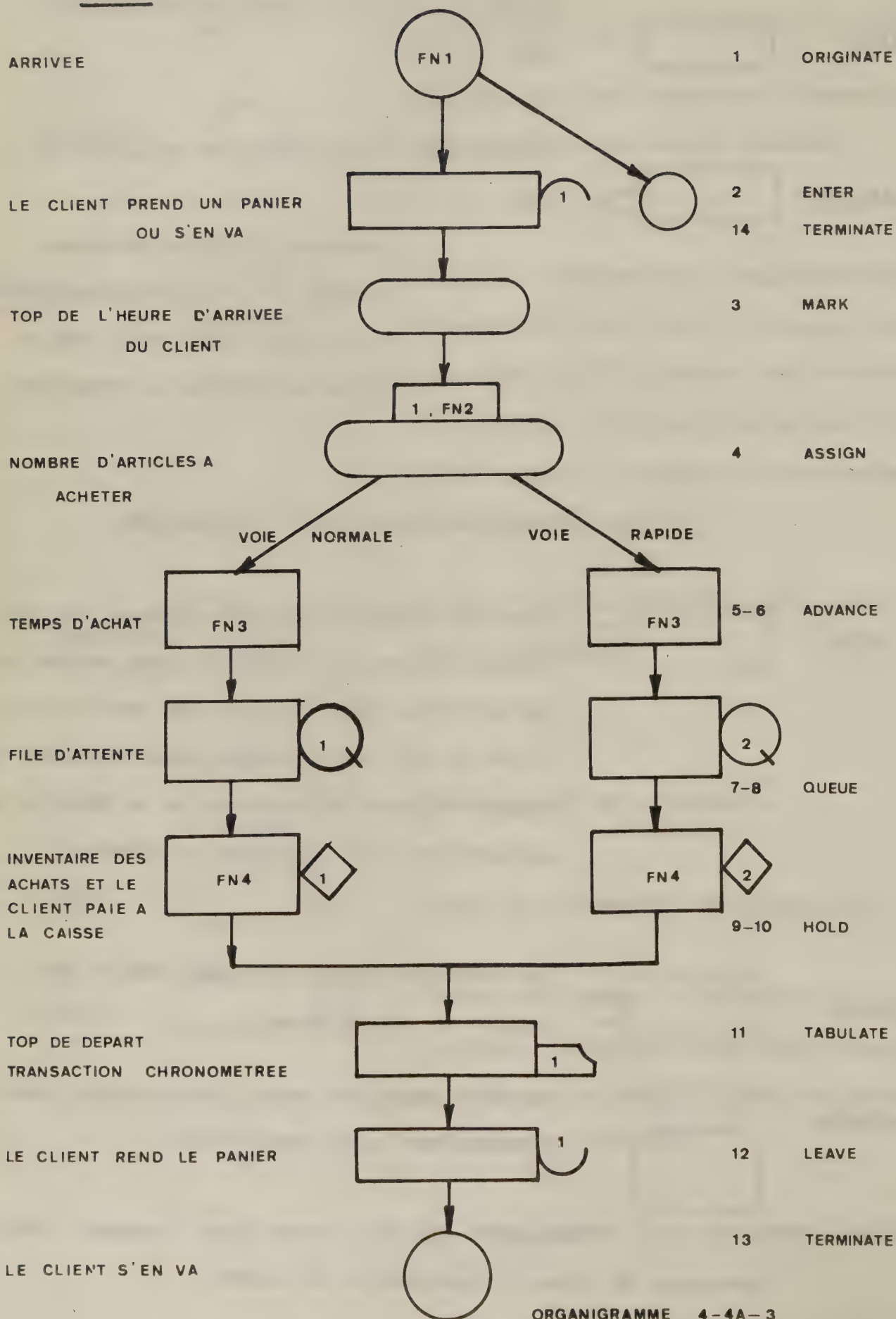
La transaction occupe une place dans le bloc, pendant un temps donné.

ASSIGN



Ce bloc donne une valeur à un paramètre, quand la transaction entre dans le bloc.

L'explication des blocs utilisés dans l'exemple choisi, permettra de suivre l'organigramme du modèle.

ACTIVITE

Le bloc 1 crée la transaction "client", à intervalles de temps définis par la loi de répartition FN1, déterminée par l'analyste.

La transaction entre dans le bloc 2, si un panier est disponible; sinon elle rejoint directement le bloc 14 et quitte le système après avoir été comptée. Le stockage 1, représentant les paniers et son aire, est égal au nombre de paniers du grand magasin.

Du bloc 2, elle passe à travers le bloc 3 où l'horloge donne le "top" du début des achats,

puis elle arrive au bloc 4 qui lui adjoint un paramètre : le nombre d'articles à acheter, défini par la loi de répartition FN2, et qui divise les clients en deux flots : ceux qui font leurs achats habituels et les autres qui n'ont qu'un ou deux articles à acheter et qui utilisent la voie, le mode de paiement et la caisse, rapides.

Ce paramètre est utilisé par les blocs 5 et 6 dont la fonction FN3 fixe le temps consacré aux achats. Les blocs 7-9 et 8-10 sont associés.

La transaction essaie d'entrer dans le bloc 7-8: s'il est libre, elle le traverse

et entre dans le bloc 9-10 où la fonction FN4 détermine le temps nécessaire à l'inventaire des achats et au paiement, en utilisant comme entrée le même paramètre défini par FN2. Si le bloc 7-8 est occupé, la transaction prend la suite de la file d'attente qui est mesurée à chaque entrée et sortie.

Après paiement, le temps de passage de la transaction dans le système est chronométré en 11.

Le panier est rendu en 12 et

Le client quitte le système en 13

I.3 PROGRAMME

Les entrées d' un programme GPSS sont définies par un certain nombre de cartes perforées.

Tout d'abord, chaque bloc est représenté par une carte sur laquelle sont portés le numéro du bloc et ses caractéristiques : moyenne, écart, priorité, fonctions, facteur de sélection, numéros des blocs qui suivent, des facilités, des stockages, et des files d'attente, compteurs de transactions etc...

Avec les cartes de blocs, sont établies celles de définitions qui fixent, par exemple, les possibilités de stockage, les lois de répartition.

Enfin les cartes de commande déterminent, en particulier, l'unité de temps, la longueur de la simulation etc...

Les données numériques qui ont servi de base à l' étude de la circulation des clients dans le magasin washingtonien comprenaient les chiffres et statistiques suivants : le magasin disposait de 150 paniers, de 7 caisses normales et 1 rapide. En gros, le 1/4 des clients utilisait la voie rapide. Les clients arrivaient à 36 ± 18 secondes d'intervalle; leurs temps d'achat étaient 2640 ± 1820 secondes en voie normale, 440 ± 220 en voie rapide, et les temps passés à la caisse étaient respectivement de 360 ± 180 secondes et 60 ± 30 secondes.

Les résultats demandés figurent sur la liste ci-après :

- 1 - Durée de simulation
- 2 - Nombre d'entrées de transactions par bloc
- 3 - Facilité N°1 : % du temps d'utilisation
- 4 - Stockages 1 et 2 : utilisation moyenne
- 5 - Files d'attente 1 et 2 : maxima, moyennes
- 6 - Statistiques diverses.

Après avoir simulé le passage de 1200 clients dans le magasin, on constatait, d'une part, que le nombre des paniers était suffisant - ceux-ci n'étant utilisés en moyenne qu'à 60% -, d'autre part, que la file d'attente, en voie normale, était en moyenne de 27 personnes, au maximum de 50, et en voie rapide, de 0,14 en moyenne et 4 au maximum.

Il était donc nécessaire d'ouvrir une nouvelle caisse pour la voie normale : telle était la conclusion de cette simulation dans l'hypothèse considérée.

Dans le GPSS, il existe une riche collection de blocs, allant de la boucle au transfert etc... La simplicité de ce langage tient à la programmation automatique des blocs, dont la séquence est fixée par l'organigramme. Un bloc correspond à une instruction qui est perforée sur une seule carte. Le "compilateur — GPSS" interprète les blocs à la manière d'un sous-programme. Il traduit, par exemple, le bloc file d'attente, sous forme des instructions suivantes :

- Calcul,
- Et enregistrement du nombre d'unités de temps, pendant lequel la file a eu la longueur présente,
- Changement de l'état de la file pour tenir compte de l'événement qui vient de se produire.

I.4 CONCLUSION

GPSS est particulièrement adapté aux problèmes de files d'attente et, dans ce secteur, il ne craint pas la comparaison avec les autres langages. Ses limites sont la conséquence d'un nombre fixe de blocs-types, qui ne sauraient représenter toutes les activités possibles d'un système. Il peut décrire de nombreuses situations, sinon leur totalité. En outre, il mobilise longtemps l'ordinateur : rançon de sa simplicité.

II. SIMSCRIPT

2.1 DESCRIPTION

Avec GPSS, Simscript est le langage de simulation le plus utilisé. Il a été mis au point par Dimsdale et Markowitz, à la "Rand Corporation". C'est un langage général, apparenté au Fortran, qui possède une structure propre et ses symboles de programmation.

Si le nombre de blocs du GPSS limite la construction des modèles, Simscript, par contre, offre des possibilités étendues, mais requiert une beaucoup plus grande habileté du programmeur.

L'unité descriptive de ce langage est l'événement, qui modifie l'état du système, instantanément et à une heure précise du temps simulé. L'état du système est constitué d'entités, définies par un ensemble de paramètres appelés attributs. Entités et attributs peuvent être permanents ou temporaires, selon qu'ils demeurent constants ou qu'ils sont créés ou détruits au cours de la simulation. Les entités peuvent faire partie d'ensembles, ou être considérées individuellement.

Le tableau suivant montre les correspondances entre GPSS et Simscript.

GPSS	SIMSCRIPT
<u>ENTITES</u>	<u>ENTITES</u>
Transactions	Temporaires
Facilités	Permanentes
Stockages	
<u>ATTRIBUTS</u>	<u>ATRIBUTS</u>
Variables	Temporaires
Paramètres	Permanents
	Ensemble de relations
<u>ACTIVITES</u>	<u>ACTIVITES</u>
Blocs	Sous-programmes
<u>CONDITIONS</u>	
<u>EVENEMENTS</u>	<u>EVENEMENTS</u>
	Sous-programmes

- Tableau 4.4A-4 - Correspondances GPSS-Simscript

Le sous-programme "événement" est conçu : pour effectuer les changements d'entités par modification des attributs, pour créer l'événement futur et détruire l'événement passé, exécuter les règles de décision, enfin pour préparer la disposition des résultats et imprimer les sorties.

La souplesse et les possibilités du Simscript apparaissent à qui considère l'ensemble des instructions concernant les entités, les diverses commandes et les fonctions prévues en sous-programmes.

: Action sur les entités :	: create, cause, file into, destroy, can- : cel, remove first, remove specific etc..
: Commandes mathématiques, logiques et de contrôle	: <i>Opérations arithmétiques</i> , compute, com- : pute number, sum, sum square, mean, mean : squares, variance, standard deviation, : accumulate into, : <i>Opérations logiques</i> , : Loop, store, for, or, and, with, do, : stop, dimension etc ..
: Commandes de décision	: go to, if ..., if empty, three ways if, : find first, find max, where is etc..
: Commandes d'entrée et de sortie	: Write, format, save, read, restore, : advance, call profit etc..
: Action sur les fonctions Fortran, sur les sous-programmes Fortran	: En particulier pour la création de nom- : bres et de variables aléatoires.

- Tableau 4.4A-5 - Aperçu des instructions Simscript

L'enchaînement des événements et la marche du temps simulé sont programmés par l'analyste, à l'aide d'entités spéciales, appelées procédures d'événements.

Un programme Simscript commence par les données de base, qui définissent les entités temporaires et permanentes, ainsi que leurs attributs ; puis le corps du programme est formé des sous-ensembles : événements, activités et fonctions. Il se termine par le sous-programme "rapport" qui prépare les résultats et les imprime.

2.2 PROGRAMME

L'exemple du grand magasin étudié en GPSS peut être expliqué et traduit en Simscript. Les activités restent les mêmes : prendre un panier, faire ses achats, payer à la caisse, rendre le panier en sortant.

Des sous-programmes calculent les temps que prennent ces activités. Pour passer d'une activité à une autre, l'analyste définit des procédures d'événements, qui, dans ce cas, relèvent du client, des achats et de la caisse. Ces procédures fixent le déroulement des événements, pour passer d'une activité à l'autre, en appelant des sous-programmes. La partie du programme Simscript concernant le passage du client à la caisse, fera mieux comprendre ce mécanisme.

INSTRUCTION N°

IF CKWT EQ 0, GO TO 6	1
FILE PRSN IN CKQ	2
GO TO 7	3
6 STORE 1 IN "CKWT"	4
CREATE CKOUT	5
CALL CHEKT	6
STORE PRSN IN PAYER	7
CAUSE CKOUT AT TIME + CT	8
7 RETURN	9

Si aucun client ne se trouve à la caisse (instruction 1), le premier de la file d'attente s'y présente alors (instruction 4). Si la caisse est déjà occupée (instruction 1), ajouter le client considéré à la file d'attente (instruction 2), puis aller en 7 (instruction 3) pour prendre en charge un nouveau client (instruction 9). Quand un client arrive à la caisse (instruction 4), la procédure d'événements caisse est appelée (instruction 5). Elle coiffe les instructions suivantes : calcul du temps CT que le client passe à la caisse (instruction 6), stockage du client considéré dans une nouvelle aire pour l'activité suivante (instruction 7), et calcul de l'heure à laquelle le client quitte la caisse (instruction 8).

Initialement, un programme Simscript était d'abord traduit en Fortran, et ce premier stade demandait généralement 1/3 du temps nécessaire ensuite au compilateur Fortran, pour la transformation du programme en langage machine. A présent Simscript a son propre compilateur, qui comme celui du GPSS, contient de nombreux sous-programmes fonctions.

2.3 CONCLUSION

Le langage Simscript est facile à assimiler ; des programmes simples peuvent être composés, après seulement une semaine d'instruction. Dans l'ensemble, il est conçu avec un grand souci d'économie de mémoires, et offre à l'analyste des ensembles tout faits, en particulier pour l'enchaînement des événements, et c'est en cela qu'il est une aide pour la construction des modèles.

Enfin, il nous apparaît que si un analyste faisait l'effort d'apprendre GPSS et Simscript, qui sont les plus connus, il posséderait l'essentiel des langages de simulation. Il pourrait, en cas de besoin, se familiariser rapidement avec tout autre langage, et même adapter l'un d'eux à son étude particulière.

III. PARTICULARITES D'AUTRES LANGAGES

3.1 GASP

Gasp a été mis au point par Philip Kiviat. Ecrit en Fortran, il est directement assimilable par tous ceux qui connaissent ce langage.

Il comprend 24 sous-programmes, liés entre eux par un programme directeur Gasp ; 23 sont composés en Fortran et le 24ème qui sert à la création de nombres pseudo-aléatoires, est écrit en FAP.

Il a pour principaux avantages : sa structure modulaire qui aide l'analyste à composer son modèle, et sa rédaction en Fortran II et IV, dont les compilateurs sont très répandus à travers le monde.

Les sous-programmes GASP sont établis pour planifier le temps simulé, pour organiser l'enchaînement des événements, les files d'attente et la création des nombres et variables aléatoires, pour l'introduction et la manipulation des données, pour la détection automatique des erreurs, et enfin pour présenter les résultats simulés.

L'unité descriptive du Gasp est l'événement. Ce langage n'entre pas en compétition avec Simscript et GPSS, qui sont surtout utilisés sur les gros ordinateurs. Il est, par contre, bien adapté aux ordinateurs de moyenne et petite taille.

3.2 DYNAMO

Dynamo est avant tout, le langage utilisé par J. Forrester dans son ouvrage "Industrial Dynamics", et par ses disciples du Massachusetts Institute of Technology. Il est conçu pour simuler les grands systèmes économiques.

Sa structure est inspirée de celle du Fortran. Il n'est adapté qu'aux ordinateurs IBM 704 et 7090. Les entrées comprennent deux types de cartes : les cartes de directions et d'équations.

Les premières concernent les instructions relatives aux entrées, au temps simulé dont le déroulement est à pas constant, aux passages sur ordinateurs, à la durée de la simulation et aux sorties présentées sous forme de tableaux et de graphiques. Les secondes comprennent la totalité des équations, qui décrivent le modèle et que Dynamo résout une à une, dans l'ordre fixé.

Dynamo nous apparaît comme un langage de laboratoire. J. Forrester, qui a contribué à son développement, s'en est servi le premier pour étudier la stabilité de grands systèmes économiques fermés, définis mathématiquement et qui évoluent sous l'effet de mécanismes d'amplification et de régulation par rétroaction. Ce langage a servi aussi à simuler le système économique des Indes et l'industrie américaine du cuir. Il symbolise ce que serait dans l'avenir un langage particulier, construit à partir d'un langage général de simulation.

3.3 GSP

GSP (General Simulation Program) est un des premiers langages de simulation. Il a été créé, dès 1960, par le spécialiste britannique de cette discipline K. Tocher, pour être utilisé sur les ordinateurs Ferranti-Pegasus et Elliot 503. De ce fait, il est très peu répandu. En outre, c'est un langage concis, ardu, conçu pour être employé par des mathématiciens et en fait, il ne l'est que par l'équipe Tocher de l'"United Steel", pour les besoins de cette compagnie.

Nous le considérons comme un outil d'étude et de laboratoire, qui a joué un rôle important dans le démarrage et la conception des langages de simulation.

GPS a donné naissance, en effet, à ESP et CSL. Le premier, employé sur Elliot 503 et 803, est écrit en Algol. Le second, mis au point par IBM-GB, est apparenté au Simscript, et fait appel aux compilateurs Fortran sur IBM 1401 et 7090. Tous les deux sont orientés vers les applications industrielles et les files d'attente.

3.4 LANGAGES DE SIMULATION ALGOL

L'Algol, connu surtout en Europe, a servi de base pour la construction de quelques langages de simulation. Deux langages britanniques, ESP et Simon, font partie de cette famille : malheureusement ils ne sont utilisables que sur Elliot 503 et 803. Simula, mis au point en Norvège, a adopté la procédure d'événement du Simgscript, pour enchaîner les entités. Il est employé sur Univac 1107-8.

Aux USA, 2 langages en Algol, SOL et Wasp, ont été écrits pour les ordinateurs Burroughs B.5000.

Ces langages sont certainement valables, mais leur champ d'action est par trop limité. De ce fait, ils ne peuvent être comparés aux Simgscript et GPSS.

Wasp, à notre avis, mériterait une attention particulière, car il est une adaptation du Simgscript en Algol.

- ANNEXE 4.5 -

EXEMPLE DE TEST EN χ^2

χ^2 a pour valeur :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

O_i étant les fréquences observées

E_i , les fréquences théoriques espérées

k , le nombre de paires de fréquences observées et espérées

v , le degré de liberté, seul paramètre dont dépend χ^2 , et qui est égal à $k-1$

La loi de χ^2 a l'allure suivante :

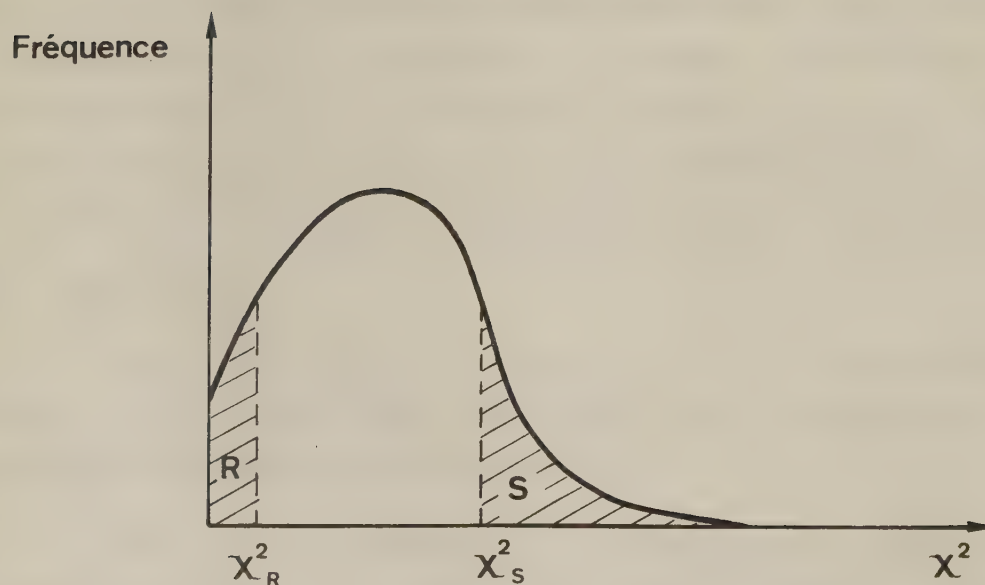


Fig. 4 - 5 A

Des tables de la fonction de répartition χ^2 ont été établies avec en abscisses v les degrés de liberté de 1 à 30, - au-delà de 30 la formule change -, et en ordonnées P les probabilités établies de 0,99 à 0,001. Pour les études de simulation, des extraits de tables sont utilisés figurant en abscisses les mêmes degrés de liberté et en ordonnées seulement deux valeurs de R et de S : $R = S = 5\%$ et $R = S = 1\%$. Ainsi deux valeurs seulement de χ^2 : χ^2_R et χ^2_S sont données par les tables.

Si le χ^2 de la population réelle est extérieur à l'intervalle $\chi^2_R - \chi^2_S$, l'hypothèse d'identité des populations observées et théoriques est réfutée ; si $\chi^2_R \leq \chi^2 \leq \chi^2_S$, l'hypothèse est acceptée.

Il est généralement admis que le nombre de paires de fréquences observées et théoriques doit être au moins égal à 5. Certains estiment qu'un minimum de 3 suffit.

Quand on utilise les tests d'hypothèse en simulation, les résultats simulés sont considérés comme les résultats observés et les données expérimentales comme les résultats espérés théoriques. Sur cette base, on calcule χ^2 , on compare sa valeur avec χ^2_S de la table pour le pourcentage de S retenu, 5 ou 1%, et le degré de liberté calculé $k - 1$; si $\chi^2 < \chi^2_S$, l'hypothèse de concordance entre les données de la loi de répartition du modèle, c'est-à-dire les résultats simulés, et les performances du système réel, est acceptée au seuil de 5 ou 1%, autrement dit la validité des résultats simulés se voit admise au départ.

Nous avons vu que les tests d'hypothèse peuvent être faits pour définir initialement la loi théorique de répartition des données expérimentales. Prenons l'exemple des arrivées d'une file d'attente. Une série d'observations donne les résultats suivants :

: Nombre de clients : arrivés dans : l'intervalle de : 2 minutes : n	: Nombre de cas observés : O_1 : : : Fréquences
0	21
1	23
2	10
3	4 (
4	1 (
5	0 (6
6	0 (
7	1 (
	60

Quand le nombre de la colonne "Fréquences" est petit, en général inférieur à 5, il est ajouté à d'autres pour accroître l'échantillon dans le groupe. C'est le cas pour les fréquences observées des nombres de clients arrivés : 3, 4, 5, 6, et 7. En traçant la courbe de répartition de ces données, on s'aperçoit qu'elle est proche d'une courbe de loi de Poisson. On calcule sa moyenne :

$$a = \frac{0 \times 21 + 1 \times 23 + 2 \times 10 + 3 \times 4 + 4 \times 1 + 5 \times 0 + 6 \times 0 + 7 \times 1}{60} = 1,1$$

et avec son équation générale, $P_n(t) = \frac{(at)^n e^{-at}}{n!}$, pour $t = 2$ minutes,

on calcule le nombre théorique d'observations correspondant à cette loi.

:	:	:	:
:	n	:	P_n
:	:	:	E_i
:	:	:	:
:	0	:	0,448
:	1	:	0,358
:	2	:	0,144
:	3)	:	:
:	4)	:	:
:	5)	:	0,049
:	6)	:	2,9
:	7)	:	:
:	:	:	:

Puis on compare les nombres réels et théoriques d'observation à l'aide du test de χ^2

:	:	:	:	:	:	:
:	Nombre de	Nombre de	Nombre de	$O_i - E_i$	$(O_i - E_i)^2$	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
:	clients	cas	cas théo-	:	:	:
:	n	observés	riques	:	:	:
:	:	O_i	E_i	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
:	0	21	26,9	- 5,9	34,81	1,29
:	1	23	21,5	1,5	2,25	0,10
:	2	10	8,6	1,4	1,96	0,23
:	3	4)	:	:	:	:
:	4	1)	:	:	:	:
:	5	0) 6	2,9	3,1	9,61	3,31
:	6	0)	:	:	:	:
:	7	1)	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	χ^2	=
:	:	:	:	:	:	<u>4,93</u>
:	:	:	:	:	:	:

La table de χ^2 donne avec 3 degrés de liberté, au seuil de 5%:7,81; comme χ^2 calculé - 4,93 - est inférieur à 7,81, l'hypothèse de concordance est acceptée, c'est-à-dire que la loi des arrivées de la file d'attente est proche d'une loi de Poisson de moyenne 1,1.

Pour vérifier la validité des résultats simulés et s'assurer qu'ils concordent avec les données expérimentales, une procédure analogue est appliquée. On détermine les conditions du test, on obtient les résultats simulés, puis on effectue, dans les mêmes conditions, une série d'observations. Enfin, on dresse le tableau suivant, pour calculer χ^2 qui est comparé au χ^2 de la table, de façon à confirmer ou rejeter l'hypothèse de concordance, c'est-à-dire à admettre, ou non, la validité des résultats simulés.

:	:	:	:	:
:	Simulation	Données	$(O_i - E_i)^2$	:
:	O_i	d'observation	$\frac{O_i - E_i}{E_i}$	:
:		E_i	E_i	:
:				:
-----	-----	-----	-----	-----
:				:
:				:
:				:
:				:
:				:
:				:
:				:
:				:
:				:
:			$\chi^2 =$	:
:				:

L'application aux résultats simulés des autres tests : test t, test F, test de Kolmogorov-Smirnov, suit une marche analogue.

ANNEXE 4.6

EXEMPLES DE MODELES DE SIMULATION CONSTRUITS EN FRANCE

- AGARD J., Détermination par Simulation du Personnel et des Moyens d'Exploitation Nécessaires à la Réalisation d'un Programme, Escale Principale d'Orly, Air France, IFORS OSLO, Juillet 1963
- AGARD J., JACQUET P. & VAUTIER J., Simulation de Rotation d'une Flotte, Air France, 1.44
- BERTHELOT F., Simulation de Gestion de Matériels, GRO, Armée de l'Air, Paris, 1.9
- BERTIER P., LE BOULANGER H & ROY B., Simulation des Comportements Aléatoires de Lecture, Le Modèle SCAL, SEMA, 1.44
- BILLET R & MIGNOT, Etude de l'Influence des Tolérances Admises Relativement aux Diamètres des Roues de Locomotives Electriques, Estimation des Coûts par des Procédures de Simulation, SNCF, 1.2
- BOSS J.F., La Simulation d'une Firma sous son Aspect Budgétaire : Simulateurs de Budget et de Plans Pluriannuels, SINCRO, 1.2
- COLAS J.D., L'Etude des Systèmes de Téléordinateurs au Moyen d'un Programme Général de Simulation, IBM FRANCE, CER LA GAUDE, 1.1
- COMES G. & BELLON J.L., Etude d'une Politique Séquentielle d'Investissements pour la Restructuration d'un Réseau d'Usines, AUROC, 1.2

- DESCROIX, LAURENT & IDLEFONSE, Etude d'un Modèle de Simulation de l'Avancement du Personnel d'Active Sous-Officier et Troupe, GRO, Armée de l'Air, Paris, 1.18
- GAREYTE Claire, Construction des Horaires de Lycée, Laboratoire de Calcul de Grenoble, 1.2
- GAUSSENS P. & PELISSIER R., Les Modèles de Gestion d'Electricité de France et Etude de la Gestion des Equipements Futurs, EDF, 1.44
- GRO, Simulation d'une Politique de Gestion Automatisée, Armée de l'Air, Paris, 1.9
- HOLL, J.C., Simulation de l'Exploitation d'un Panneau de Charbon, SEMA, 1.40
- MENSCH A.J.H., Simulation Digitale et Evaluation de Tactiques Navales : Modèle du Dérobement d'un Sous-Marin au Schnorchel contre une Torpille Acoustique Passive, Modèle d'un Barrage anti-Sous-Marins de Bâtiments de Surface, Marine Nationale, Toulon, 1.40
- PREVOTEL & DE LAMAZIERE, Simulation de Gestion Automatisée des Matériels et d'une Politique d'Exceptions, GRO, Armée de l'Air, 1.46
- STEINBERG N., Un Modèle de Simulation pour Evaluer l'Efficacité d'un Plan de Supports, CEGOS-AUROC, 1.2
-

BIBLIOGRAPHIE

I.- ETUDES, CONFERENCES ET COMMUNICATIONS

- 1.1 AFCALTI, 3ème Congrès de Calcul et de Traitement de l'Information, Dunod Paris, Mai 1963
- 1.2 AFIRO, Actes du Cinquième Congrès, tenu à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille, Juillet 1966, AFIRO 25 Rue JASMIN, PARIS 16ème
- 1.3 AHUJA Balder K., Inventory Control Systems with Stochastic Replenishment Time, MC 61-3077, The University of Wisconsin, USA, 1961
- 1.4 ALLEN Arthur A., The Applicability of Simulation and Gaming to the Management of Foreign Policy, Industrial College of the Armed Forces, Washington D.C., USA, March 1964
- 1.5 ANTHONY Robert N., Planning and Control Systems, Harvard University, Boston MA., USA, 1965
- 1.6 ARVANITIS Loucas G., Decision Rules for Design of Forest Sampling Systems : A Contribution to Methodology Based on Computer Simulation, MC 66-8264, University of California, Berkeley, USA, 1966
- 1.7 ASHBY Ross, VON BERTALANFFY Ludwig & RAPOPORT A., General Systems, Yearbook of the Society for General System Research, Volume III, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1958
- 1.8 BALINTFY Joseph L., Mathematical Models and Analysis of Certain Stochastic Processes in General Hospitals, MC 63-3616, The Johns Hopkins University, USA, 1962

- 1.9 BERTHELOT F., Simulation de Gestion de Matériels, N° 185, GRO, 24, Boulevard Victor, Paris 15ème, Juillet 1965
- 1.10 BRENNER Michael E., Correlated and Selective Sampling Applied to the Simulation of Some Inventory Systems, MC 63.5912, The Johns Hopkins University, USA, 1963
- 1.11 BULL GENERAL ELECTRIC, Simulation Electronique des Ports de Commerce Ref : OO-11-030F, 94 Avenue Gambetta, Paris 20ème
- 1.12 BULL GENERAL ELECTRIC, Jeux d'Entreprise et Aperçu sur les Procédés de Simulation, 94 Avenue Gambetta, Paris 20ème, Décembre 1960
- 1.13 CHINGARI Gastone, A Methodology for the Simulation of Numerically Controlled Production Systems, MC 66-5521, University of California, Los Angeles, USA, 1966
- 1.14 CHU Kong, Computer Simulation of Certain Stochastic Relationships in Microeconomic Systems, MC 64-13.699, Tulane University, USA, 1964
- 1.15 C.N.R.S., 3ème et 4ème Congrès de Calcul et de Traitement de l'Information, 1963 et 1965, Dunod, Paris
- 1.16 COLIN Hammon, The Design and Construction of a Computer Simulation, United States Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA June 1965
- 1.17 CONWAY R.W., Some Tactical Problems in Simulation Method, RM 3244-PR, The Rand Corporation, Santa Monica, USA, November 1962
- 1.18 DESCROIX, LAURENT & ILDEFONSE, Etude d'un Modèle de Simulation de l'Avancement du Personnel d'Active Sous-Officiers et Troupe de l'Armée de l'Air, N° 77, GRO, 24 Boulevard Victor, Paris XV, Mars 1963

- 1.19 DRABEK Thomas E., Laboratory Simulation of a Police Communication System under Stress, MC 66-1771, The Ohio State University, USA, 1965
- 1.20 FEUVRIER C.V., Comparison of Algol, Fortran and Cobol, The American University, Washington D.C., USA, August 1966
- 1.21 FEUVRIER C.V., Impact of Information and Reporting Systems on Hospital Industry, The American University, Washington D.C., USA, May 1966
- 1.22 FEUVRIER C.V., Storage and Retrieval of Medical Records, The American University, Washington D.C., USA, 1966
- 1.23 FEUVRIER C.V., Une Solution Economique au Problème de la Formation et de l'Entraînement du Personnel Navigant de l'Armée de l'Air, grâce aux Simulateurs de Vol Electroniques, Blondel Le Rougery, 7 rue St Lazare, Paris 9ème, 1953
- 1.24 FEUVRIER C.V., Verbal and Political General Systems Theories and their Computer Simulation, The American University, Washington D.C., USA, 1967
- 1.25 FRANK, KUEHN & MASSY, Quantitative Techniques in Marketing Analysis, Richard D. Irwin Inc., Homewood Ill., 1962
- 1.26 GASS Saul I., Computer Simulation Techniques in Project Mercury, IBM Federal Systems Division, Washington D.C., USA
- 1.27 GRO, Simulation d'une Politique de Gestion Automatisée des Matériels, N° 74, GRO, 24 Boulevard Victor, Paris 15ème, Avril 1966
- 1.28 HOWARD & KAUFMAN, Numerical Analysis of System Availability and of Parameter Estimation Methods, 6101-8161-TU 000, Space Technology Laboratories, Redondo Beach, California, USA, August 1963

- 1.29 HUTCHINSON George K., The Design and Simulation of a Management Information and Control System, MC 64-7653, Stanford University, USA, 1964
- 1.30 IBM, GPSS III, H 20 - 0144 - 0
GPSS/360, H 20 - 0186 - 1
GPSS III, User's Manual H 20 - 0163
112 East Post Road, White Plain, New-York 10601
- 1.31 IBM, Introduction to Control Systems, F 26 - 55 770, White Plains, New-York
- 1.32 IBM, System/360, An Introduction to Simulation, Department of Education, White Plains, New-York, 1967
- 1.33 IFIP Simulation Programming Languages, Proceedings of the Technical COMMITTEE 2 WORKING CONFERENCE, BUXTON Editor, NORTH Holland Co, AMSTERDAM, 1968
- 1.34 KREWERAS & MORLAT éditeurs, Actes de la 3ème Conférence Internationale de Recherche Opérationnelle, Oslo, 1963, Dunod, Paris
- 1.35 LACKNER Michael R., Digital Simulation and System Theory, System Development Corporation, 2500 Colorado Avenue, Santa Monica, California, USA, April 1964
- 1.36 LAUDON Grace E., Development of a Generalized Cafeteria Simulator, MC 63-7641, The University of Wisconsin, USA, 1963
- 1.37 MANETSCH Thomas J., Analysis of the United States Softwood Plywood Industry, MC 65-9198, Oregon State University, USA, 1965
- 1.38 MEYER Herbert, Symposium on Monte-Carlo Methods, Held at the University of Florida, John Wiley & Sons, New-York, 1954

- 1.39 MOY William A , Sampling Techniques for Increasing the Efficiency of Simulations of Queuing Systems, MC 66-2730, Northwest University, USA, 1966
- 1.40 NATO Panel, Digital Simulation in Operational Research, The English Universities Press, London E.C.4, 1965
- 1.41 NATO Panel, Proceedings of Conference on Design and Analysis of Field Experiments, Rome, May 1966, CIRC, 94 Arcueil
- 1.42 NOEL Robert C., A Simplified Political Economic System Simulation, MC 64.5861, Northwestern University, USA, 1963
- 1.43 O'CONNOR Thomas J., Analysis of a Computer Time-Sharing System A Simulation Study, MC 65-12.287, Stanford University, USA, 1965
- 1.44 O.R., The Fourth International Conference on Operational Research - Pre-Prints of the Proceedings - H 1 Simulation, International Federation of O.R. Societies, Boston, USA, 1966
- 1.45 ORCUTT, GREENBERGER, KORBEL & RIVLIN, Microanalysis of Socio-economic Systems : A Simulation Study, Harper & Row, New-York, 1961
- 1.46 PREVOTEL & WIESENBAACH DE LAMAZIERE, Simulation de Gestion automatisée des Matériels et d'une Politique d'Exceptions, GRO N° 180, Armée de l'Air, 24 Boulevard Victor, Paris 15ème, Juillet 1965
- 1.47 RUMMER Dale I., Investigation of a Class of Digitally Compensated Sampled-Data Control Systems by Digital Simulation, MC 64-8512 University of Kansas, USA, 1963
- 1.48 TOSCANO Francisco C., A Generalized Methodology for the Simulation of Transportation Systems, MC 65-8802, University of California, Los Angeles, USA, 1965

- 1.49 WALTON Jay R., A Simulation Method of Analysis for Systems of Urban Roads, MC 64-6332, North Carolina State of the University of N.C. at Raleigh, USA, 1963
- 1.50 WESTERVELT F.H., A Study of Automatic System Simulation Programming and the Analysis of the Behavior, MC 61-1807, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 1961

II.- OUVRAGES

- 2.1 ACKOFF Russell L., Editor, Progress in Operations Research, Volume 1, John Wiley & Sons, New-York, 1961-1966 .
- 2.2 ACKOFF R & SASIENI, Fundamentals of Operations Research, John Wiley & Sons, New-York, 1968
- 2.3 AGARD J. & Groupe, Les Méthodes de Simulation, AFIRO, Dunod, Paris 1968
- 2.4 AGARD J., Méthodes de Simulation Monte-Carlo et Jeux d'Entreprise, Cours de 3ème Cycle, University de Paris, 1964
- 2.5 BROSS Irwin D., Design for Decision, The Free Press, New-York, 1963-1965
- 2.6 BUZZEL Robert D., Mathematical Models and Marketing Management Harvard University, 1964
- 2.7 CHOROFAS Dimitris N. La Simulation Mathématique et ses Applications Dunod, Paris, 1966
- 2.8 CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF, Introduction to Operations Research, John Wiley, New-York, 1957-1966
- 2.9 EASTON David, A Systems Analysis of Political Life, John Wiley & Sons, New-York 1965

- 2.10 EASTON David Editor, Varieties of Political Theory, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1966
- 2.11 EVANS George, WALLACE Graham & SUTHERLAND Georgia, Simulation Using Digital Computers, Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey, 1967
- 2.12 FORRESTER Jay W., Industrial Dynamics, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1964
- 2.13 FOURGEAUD C. & FUCHS A., Statistique, Dunod, Paris 1967
- 2.14 GREGORY & VAN HORN, Le Traitement de l'Information dans l'Entreprise - Traduction - C. Roux - Dunod, Paris
- 2.15 GUETZKOW Harold & Others, Simulation in International Relations, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1963
- 2.16 GUETZKOW Harold, Simulation in Social Science Readings, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1962
- 2.17 HEAD Robert V., Real Time Business Systems, Holt Rinehart & Winston, New-York, 1964
- 2.18 HEIN Leonard W., The Quantitative Approach to Managerial Decisions, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1967
- 2.19 HERTZ David B. & EDDISON Roger T., Progress in Operations Research, Volume II, John Wiley & Sons, New-York, 1964
- 2.20 IBM, Proceedings IBM, Scientific Computing Symposium Simulation Models and Gaming, Data Processing Division, White Plains, New-York, 1966
- 2.21 JOHNSON Richard, KAST Fremont & ROSENZWEIG James, Theory and the Management of Systems, Mc Graw Hill, New-York, 1963
- 2.22 KAUFMANN A., Méthodes et Modèles de la Recherche Opérationnelle, Dunod, Paris, 1959

- 2.23 KAUFMANN A., FAURE R., & LE GARFF A., Les Jeux d'Entreprises, Collection Que Sais-je, Presses Universitaires de France, Vendôme, 1964-2
- 2.24 MC DONOUGH Adrian M., Information Economics and Management Systems, Mc Graw Hill, New-York, 1963
- 2.25 MC KENNEY James, Simulation Gaming for Management Development Harvard University, Boston, Ma., 1967
- 2.26 MC MILLAN C. & GONZALES R., Systems Analysis, Richard D. Irwin Inc. Homewood, Illinois, 1965
- 2.27 MIZE J. & COX J., ESSENTIALS of SIMILATION, Prentice-Hall, ENGLEWOOD CLIFFS, N.J., USA, 1968
- 2.28 MORRIS William, Management Science in Action, Richard D. Irwin Inc. Homewood, Illinois, 1963
- 2.29 MULLER Yves, Initiation à l'organisation et à la Recherche Opérationnelle, Editions Eyrolles, Paris, 1965
- 2.30 NAYLOR T., BALINTFY J., BURDICK D., CHU Kong, Computer Simulation Techniques, John Wiley & Sons, New-York, 1966
- 2.31 NORD Ole C., Growth of a New Product, MIT Press, Cambridge, Ma., 1963
- 2.32 OPTNER Stanford I., Systems Analysis for Business Management, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1960
- 2.33 PACKER David W., Resource Acquisition in Corporate Grow, MIT Press, Cambridge, Ma. 1964
- 2.34 PUGH Alexander L., Dynamo User's Manual, MIT Press, Cambridge, Ma. 1961
- 2.35 ROBERTS Edward B., The Dynamics of Research and Development, Harper & Row, New-York, 1963

- 2.36 ROSENSTIEHL P. & GHOUILA-HOURI A , Les Choix Economiques, Décisions Séquentielles et Simulation, Dunod, Paris, 1960
- 2.37 SAATY T., Mathematical Methods of Operations Research, Mc Graw-Hill, New-York, 1959
- 2.38 SHREIDER Yu.A , The Monte-Carlo Method, Pergamon Press, New York, 1966
- 2.39 TOCHER, K.D., The Art of Simulation, English Universities Press, London & D. Van Nostrand Co., Princeton, New Jersey, 1963
- 2.40 TOMKINS & MESSICK Editors, Computer Simulation of Personality John Wiley & Sons, New-York, 1963
- 2.41 OLMI & JULY, La Simulation de Gestion, Editions du Tambourinaire, PARIS 8e, 1969.

III.- ARTICLES

- 3.1 ADAMS R. & JENKINS J., Simulation of Air Operations with the Air Battle Model, Operations Research, Volume 8, 1960
- 3.2 Aviation Week & Space Technology, Kennedy Space Center, Special Report, Mc Graw-Hill, June 20, 1966
- 3.3 BLAKE & GORDON, Systems Simulation with Digital Computers, IBM Systems Journal, Volume 3, No. 1, 1964
- 3.4 BROPHY, KEENAN & PALAZZO, A Simulation Technique to Optimize the Support Ressources of Aircraft Weapon Systems from Concept through Production MC 66-785, AIAA, 1290 Avenue of the Americas, New-York, October 1966
- 3.5 BROTMAN L. & MINKER J., Digital Simulation of Complex Traffic Problems in Communications Systems, Radio Corporation of America, Camdan, N.J., February 1957
- 3.6 CALLAWAY T., Eurocontrol : International Co-opération in Air Traffic Control, Aerospace Systems, GB, February 1967

- 3.7 CLARK Colin, A System of Equations Explaining the US Trade Cycle 1921 to 1941, *Econometrica*, Volume 17, N°2, April 1949
- 3.8 COHEN & CYERT, Computer Models in Dynamic Economics, *The Quarterly Journal of Economics*, Volume 75, N°1, February 1961
- 3.9 CONTENSOU & PICOT, Systèmes, sûreté de fonctionnement et sécurité, *Revue française d'Informatique et de R.O.*, N°9B1, Mai-Juin 1968, Dunod Editeur, Paris
- 3.10 COPLIN William D., Inter-Nation Simulation, *American Political Science Review*, September 1966
- 3.11 CRUON R., Introduction à la Simulation sur Ordinateurs, N°599, CIRO, 94 Arcueil, Janvier 1967
- 3.12 CRUON R., Techniques de Réduction de Variance, Cours APSIM/NC/2, CIRO, 24, Avenue de la Côte d'Or, 94 Arcueil, Avril 1967
- 3.13 DIMSDALE B. & MARKOWITZ H., A Description of the Simscrip Language, *IBM Systemes Journal*, Volume 3, N°1, 1964
- 3.14 EHRENFELD S. & BEN-TUVIA S., The Efficiency of Statistical Simulation Procedures, *Technometrics*, Volume 4, N°2, May 1962
- 3.15 FETTER R. & THOMPSON J., The Simulation of Hospital Systems, *Operations Research*, September-October 1965
- 3.16 FLEHINGER Betty J., System Reliability as a Function of System Age, *Operations Research*, Volume 8, 1960
- 3.17 FORD Lester, ISAACSON & PETHHEL, Computer Terrain Simulation for Line of Sight Calculations, *Operations Research*, Volume 7, 1959

- 3.18 FOSTER F. & ELCE I., A Simulation Programme for Machine Maintenance, Telephone, Traffic and Stock Models, Operational Research Quaterly, Volume 12, N° 1, May 1961
- 3.19 FRIEND Irvin & TAUBMAN P., A Short-Term Forecasting Model, The Review of Economics & Statistics, Volume 46, August 1964, Number 3
- 3.20 GORDON G., A General Purpose Systems Simulator, IBM Systems Journal, September 1962
- 3.21 GREENBERGER Martin, A New Methodology for Computer Simulation, MAC-TR-13, Project MAC, MIT, Cambridge, Ma., October 1964
- 3.22 GREMY Jean-Paul, L'Analyse Multidimensionnelle de l'Incertitude, une Etape vers la Simulation des Phénomènes Sociaux, Metra 1966, P. 453-470
- 3.23 GUNN William, Airline System Simulation, Operations Research, Volume 12, 1964
- 3.24 HARRISON, R.N., ATC Simulation for the R.A.F., World Aerospace Systems, Hanover Square, London W1, February 1967
- 3.25 HERVE Philippe, Génération de Variables Aléatoires en Simulation, N° 685, CIRO, 94 Arcueil, Avril 1967
- 3.26 HOWLAND Daniel, A Hospital System Model, Nursing Research, Volume 12, N° 4, 1963
- 3.27 KIVIAT Philip, Development of Discrete Digital Simulation Language, Simulation, February 1967
- 3.28 KRASNOW H. & MERIKALLIO R., The Past, Present and Future of General Simulation Languages, Management Science, Volume 11, N° 2, November 1964
- 3.29 LERMOYEZ M., Les Simulateurs, N° 59 et 60, Docaéro, Novembre 1959

- 3.30 MALCOLM Donald G., System Simulation. A Fundamental Tool for Industrial Engineering, The Journal of Industrial Engineering, May-June 1958
- 3.31 MC PHEE William N., Note on a Campaign Simulator, The Public Opinion Quaterly, Volume 25, N° 2, Summer 1961
- 3.32 NOBLE Tom, Highlights of Two and One Half Years of Simulation Efforts for Deep Submergence Vehicles, Simulation, May 1967
- 3.33 ORCUTT Guy H., Simulation of Economic Systems, The American Economic Review, Volume 50, N° 5, December 1960
- 3.34 REITMAN Julian, Simulation of a Manufacturing System, Simulation, June 1967
- 3.35 SASSER W. & NAYLOR T., Computer Simulation of Economic Systems, Simulation, January 1967
- 3.36 SMITH E.C., Simulation in Systems Engineering, IBM Systems Journal, September 1962
- 3.37 TOCHER D.D., Review of Simulation Languages, The United Steel Company, Operational Research Quaterly XVI, June 1965
-

DEUXIEME THESE

PROPOSITIONS DONNEES PAR LA FACULTÉ

"APPLICATION : SIMULATION D'UN SYSTEME"

Vu et approuvé

Paris, le 13 Mai 1970

Le Doyen de la Faculté des Sciences de Paris

Marc Zamansky

Vu et permis d'imprimé

Le Recteur de l'Académie de Paris

Robert Mallet

